

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE DESIGN

METODIKA USTAVENÍ SOUŘADNÉHO SYTÉMU PRO OPTICKÉ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ PONTOS

METHODOLOGY OF COORDINATE SYSTEM SETUP FOR OPTICAL MEASURING DEVICE
PONTOS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ALEŠ VOLEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. DANIEL KOUTNÝ

ABSTRAKT

V diplomové práci se zabývám vytvořením detailní a v praxi použitelné metodiky pro definování souřadného systému zařízení Pontos. Řešení spočívá v nalezení vhodného způsobu zaznamenání pozice referenčního bodu na povrchu vozidla, jehož polohu v souřadném systému vozu známe z CAD dat. V první části je řešena konstrukce adaptérů, které vymezují polohu referenčního bodu. V druhé části je popsána metodika softwarové implementace řešení a na závěr zhodnocena přesnost a samotný přínos realizovaného řešení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optické měřicí systémy, fotogrammetrie, vozidlo, deformace, Python.

ABSTRACT

The graduation thesis deals with invention of detailed definition of the coordinate system for Pontos system. The solution is based on suitable localization method of the point on a car body, whose coordinates are known from CAD data. First part of the thesis describes the design of adapter which determines the reference point. Software solution is presented in second part. Contribution of the work and accuracy of the method are discussed in the end.

KEY WORDS

Optical measurement systems, photogrammetry, car, deformation, Python

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE DLE ČSN ISO 690

VOLEK, A. *Metodika ustavení souřadného systému pro optické měřicí zařízení Pontos*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci vypracoval samostatně a v seznamu literatury uvedl všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne

.....
Aleš Volek

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Miloslavu Drápelovi za technické zázemí, díky němuž jsem tento projekt úspěšně dokončit.

OBSAH

OBSAH	11
ÚVOD	13
1. PŘEHLED SOUČASNÝCH TECHNICKÝCH POZNATKŮ	14
1.1 Fotogrammetrie	14
1.1.1 Rozdělení fotogrammetrie	14
1.1.2 Proces pořízení a vyhodnocení snímku	15
1.1.3 Matematický základ fotogrammetrie	16
1.1.4 Vyrovnání bloku projekčního svazku	18
1.1.5 Historický vývoj fotogrammetrie	19
1.2 Optické měřicí systémy	21
1.2.1 Systém Pontos	21
1.2.2 Systém Tritop	27
2. FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA	28
3. VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	29
4. NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ	30
5. NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY	31
5.1 Varianta č.1 – adaptér pro referenční body na podélnících karoserie	34
5.2 Varianta č.2 – adaptér pro referenční body pod prahy karoserie	35
5.3 Zhodnocení variant	36
6. KONSTRUKČNÍ A SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ	37
6.1 Konstrukční řešení	37
6.1.1 Vačkový mechanismus	37
6.1.2 Extenzní válec	37
6.2 Softwarové řešení	38
6.2.1 Python	38
6.2.2 Úvaha nad softwarovým řešením - kalibrace adaptérů a stojanu	39
6.2.3 Popis činností při určování souřadného systému	41
6.2.4 Vývojové diagramy pro jednotlivá makra	43
6.2.5 Zhodnocení softwarového řešení	46
7. ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ	48
7.1 Ověření přesnosti	48
7.2 Ověření funkčnosti při účasti na měřeních	49
8. DISKUZE	52
8.1 Závěr	52
8.2 Možnost další návaznosti na diplomovou práci	53
8.2.1 Určování souřadného systému pro specifické případy	53
8.2.2 Možnost využití informací o reálném stavu karoserie	53

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	54
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	56
SEZNAM OBRÁZKŮ	57
SEZNAM TABULEK	58
SEZNAM PŘÍLOH	59

ÚVOD

Dnešní průmysl je neustále ovlivňován sílící konkurencí, která na jedné straně nutí ke snižování nákladů na vývoj a výrobu produktů, ale zároveň vyžaduje od finálních výrobků adekvátní kvalitu.

Jedna z cest, jak snížit rostoucí náklady na vývoj, je zavádění inovativních metod simulací a virtuálních prototypů. Pomocí těchto metod dokážeme v předstihu simulovat chování konstrukčních celků a optimalizovat tak jejich samotný návrh bez potřeby nákladné výroby fyzického prototypu. Dochází tím také ke snížení časů potřebných ve vývojové fázi, což je např. v automobilovém průmyslu jedna ze zásadních věcí.

Simulace samotná je tedy velice důležitá, ale je zapotřebí ověřit její správnost v reálném testu. K průběhu výpočtu je také občas nutné zjištění některých fyzikálních charakteristik. K těmto účelům slouží mimo jiné měřicí systémy, a to jak konvenční, užívající fyzických senzorů, tak také optické bezkontaktní systémy. Smyslem konvenčních metod je aplikace senzorů posunutí či zrychlení na zkoumanou oblast konstrukce, což s sebou nese několik nevýhod. Výsledky senzorů posunutí v jednom směru mohou být ovlivněny posunutím v jiných směrech a senzory zrychlení bývají náchylné na zkreslení výsledků při nízkých hodnotách zrychlení. Instalace a kabeláž senzorů je navíc často náročná jak časově, tak i prostorově.

Většinu těchto nevýhod řeší použití optických měřicích systémů využívajících principů fotogrammetrie ke snímání a vyhodnocení polohy bodů. Měření probíhá bezkontaktně za pomoci kamer a libovolného počtu měřicích bodů. Tyto body svou nízkou hmotností ($\leq 0,1g$) a snadnou aplikovatelností neovlivňují, na rozdíl od senzorů, většinu konstrukcí a lze je uplatnit i v tak náročných oblastech měření jako je např. chování v aerodynamickém tunelu. Tyto metody pak dále umožňují simultánní zisk mnohem více informací o pohybu a poloze jednotlivých bodů, než to bylo možné při použití senzorů.

Při aplikaci těchto měřicích metod v praxi je však častým problémem porovnání naměřených výsledků z fyzického objektu s virtuálními modely. Hlavní úlohu v těchto případech hraje co možná nejvěrnější vztahování reálné geometrie na geometrii v CAD a jiných systémech.

Diplomová práce spojuje jak konstrukční, tak analytický přístup k řešenému problému.

1. PŘEHLED SOUČASNÝCH TECHNICKÝCH POZNATKŮ

Abychom byli schopni plně pochopit funkci a požadavky optických měřících systémů, je potřeba zaměřit se na základní princip, na kterém jsou založeny a tím je fotogrammetrie.

1.1 Fotogrammetrie

Pod pojmem fotogrammetrie rozumíme všeobecné metody, které jsou schopny získat z jednoho či více snímků nepřímou metodou informace o tvaru a poloze objektu, který je na snímku zachycen [1]. Fotogrammetrii je tedy možné uplatnit v zásadě všude, kde lze požadovaný objekt vyfotografovat a následně vyhodnotit.

1.1.1 Rozdělení fotogrammetrie

Podle místa pořízení snímku a vzdálenosti (h)

- vesmírná - vyhodnocení snímků z dalekohledů a satelitů ($h \geq \text{cca } 200\text{km}$)
- letecká - vyhodnocení snímků z letadla ($h \geq \text{cca } 300\text{m}$)
- pozemní - snímkování míst spjatých s povrchem ($h \leq \text{cca } 300\text{m}$)
- blízká - ($h \leq 300\text{m}$)
- makro - makroskopické záběry

Podle počtu snímků pořízených současně

- 1 snímek
- 2 snímky (stereo fotogrammetrie)
- více snímků

Podle stylu pořízení a vyhodnocení snímků

- snímky pořízené na měřícím stole - grafické vyhodnocení (do roku 1930)
- analogová fotogrammetrie - analogové kamery, opticko-mechanické vyhodnocení (do roku 1980)
- analytická fotogrammetrie - analogové snímky, počítačově řízené vyhodnocení
- digitální fotogrammetrie - digitální snímky, počítačově řízené vyhodnocení
- videogrammetrie - využití videokamer
- liniová fotogrammetrie - vyhodnocení pomocí přímek

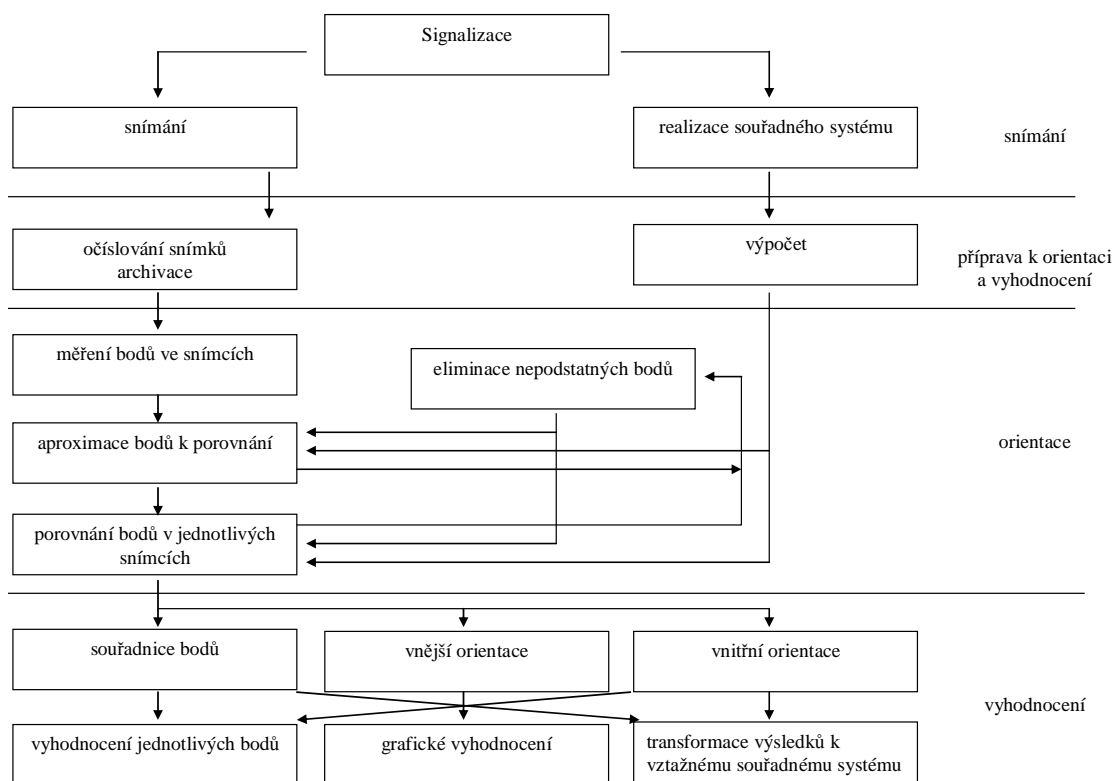
Podle časové dostupnosti snímků [2]

- real time - snímání a vyhodnocení jednoho snímku v reálném čase v průběhu zadaného procesu. Frekvence snímání koresponduje s frekvencí změny (deformace, pohyb..) objektu.
- offline - sekvenční snímkování, časově nebo prostorově oddělené vyhodnocení.
- online - simultánní snímání více snímků a bezprostřední vyhodnocení této skupiny snímků. Kamery většinou přímo připojeny k počítači.

V rozdělení fotogrammetrie bychom mohli dále pokračovat podle rozdílných kritérií jako například oblast použití a podobně.

1.1.2 Proces pořízení a vyhodnocení snímku

1.1.2



Popis jednotlivých činností:

Snímání

- **signalizace:** definice a označení bodů za účelem automatizace a zvýšení přesnosti měření
- **realizace souřadného systému** určením referenčních bodů
- **snímání obrázku:** snímání pomocí fotogrammetrických systémů

Příprava pro orientaci a vyhodnocení

- **očíslování snímků** za účelem identifikace jednotlivých záběrů a uložení snímků do paměti
- **výpočet** souřadnic nasnímaných bodů

Orientace

- **identifikace a měření** nasnímaných bodů
- **aproximace bodů** určených k porovnání
- **porovnání bodů v jednotlivých snímcích**
- **eliminace nepodstatných bodů**, vzniklých chybnou identifikací bodů (např. odraz, šmouha atd.)

Vyhodnocení

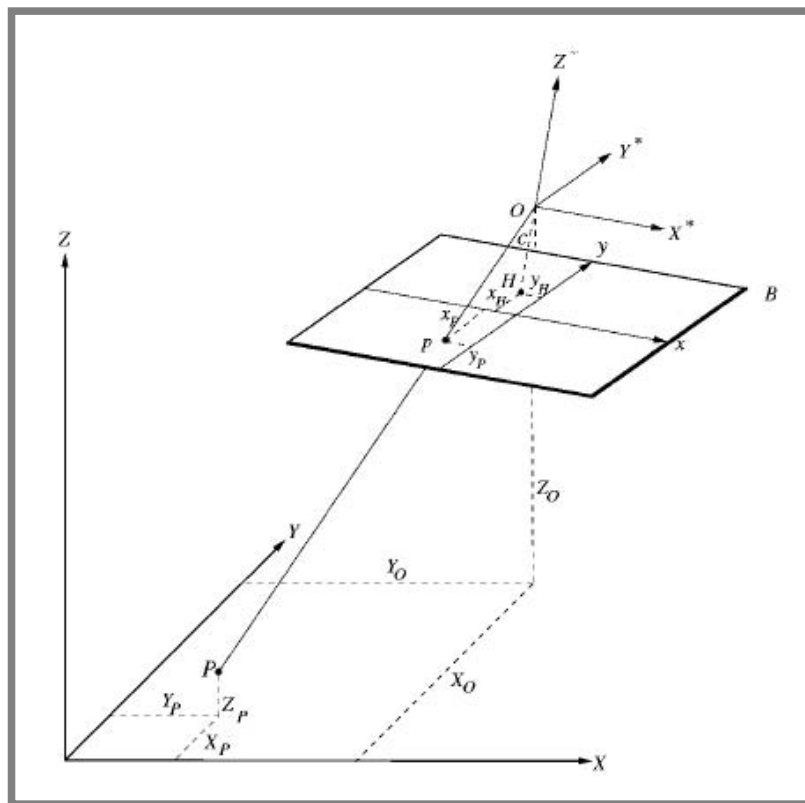
- **souřadnice bodů**: cílem je určení třídimenzionálních souřadnic bodů za účelem dalšího numerického zpracování
- **grafické vyhodnocení** požadovaných charakteristik (deformace, útlum,...)
- **transformace výsledků k požadovanému souřadnému systému** (např. souřadný systém vozu)

1.1.3 Matematický základ fotogrammetrie

K popisu projekce objektu na rovinu snímku zavádíme tzv. *model kamery* [3], [4], [5].

Model kamery

Fotogrammetrie využívá principů paprskové optiky, což znamená, že měřicí bod $P(X_P, Y_P, Z_P)$, jeho obraz $p(x_p, y_p)$ v rovině snímku B a střed projekce $O(X_o, Y_o, Z_o)$ leží na jedné projekční přímce (viz Obr. 1).



Obr. 1 Model kamery (rovina snímku B je kvůli lepší názornosti zrcadlena) [3]

B	- rovina snímku
c	- ohnisková vzdálenost
x, y	- souřadný systém snímku
x_H, y_H	- souřadnice ohniska v rovině snímku
x_P, y_P	- souřadnice měřícího bodu P promítnutého do roviny snímku
X, Y, Z	- souřadný systém objektu
X^*, Y^*, Z^*	- pomocný souřadný systém
X_O, Y_O, Z_O	- souřadnice středu promítání v souřadném systému v souřadném systému objektu
X_P, Y_P, Z_P	- souřadnice měřícího bodu P v souřadném systému objektu

Vztah mezi souřadnicemi bodu P v souřadném systému objektu a souřadným systémem snímku lze vyjádřit takto:

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \end{bmatrix} = \frac{-c}{Z_P^*} \cdot \begin{bmatrix} X_P^* \\ Y_P^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \quad (1)$$

kde:

$$\begin{bmatrix} X_P^* \\ Y_P^* \\ Z_P^* \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} X_P - X_O \\ Y_P - Y_O \\ Z_P - Z_O \end{bmatrix} \quad (2)$$

X_p^*, Y_p^*, Z_p^*	- pomocný souřadný systém měřicího bodu P
dx, dy	- zkreslení objektivu
R	- matice rotace

Ohnisková vzdálenost c , souřadnice ohniska (x_H, y_H) a koeficienty popisující zkreslení objektivu (dx, dy) nazýváme parametry **vnitřní orientace** snímku. Souřadnice středu promítání (X_O, Y_O, Z_O) a matice rotace R závisejí na poloze kamery v globálním souřadném systému a proto je nazýváme parametry **vnější orientace** kamery.

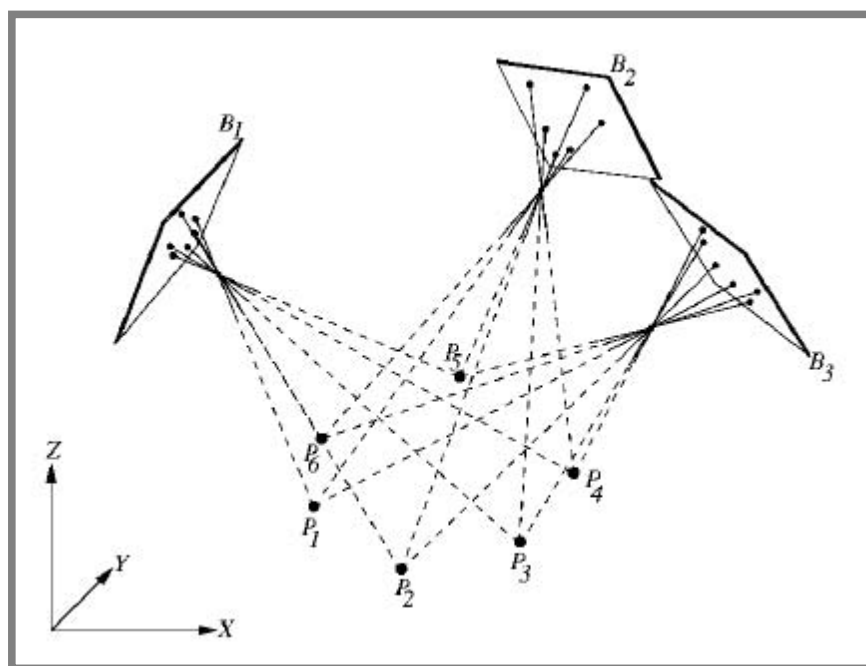
Matice R je ortogonální maticí rotace a můžeme ji vyjádřit tímto tvarem:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.1.4 Vyrovnání bloku projekčního svazku

Princip svazkového vyrovnání se používá při určení neznámých souřadnic bodu a zároveň k určení parametrů uspořádání a detekce snímku. Vyžaduje nejméně dva snímky z odlišných pozic s částečným překryvem pozorované oblasti [6]. Měřicí bod musí být tedy viděn alespoň ve dvou snímcích, aby bylo možné vytvořit dostatečný počet rovnic vedoucích k určení jeho pozice.

Souřadnice snímku společně se středem promítání určují svazky projekčních paprsků (viz Obr. 2)



Obr. 2 Určení souřadnic měřicích bodů P_i vyrovnáním svazků projekčních paprsků z různých rovin snímků B_i [3]

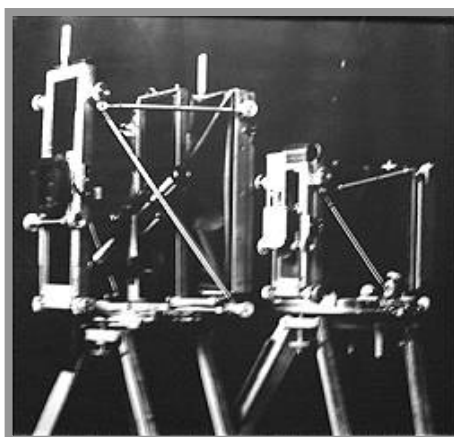
1.1.5 Historický vývoj fotogrammetrie

1.1.5

Historický vývoj fotogrammetrie sahá k samotnému počátku fotografie (Niepce a Daguerre – 1839). Krátce po objevu fotografie byly provedeny první na sobě nezávislé techniky měření pomocí snímku francouzským důstojníkem Laussedatem (1851, „Métrophotographie“) a německým architektem Albrechtem Meydenbauerem (1858, „Messbildungsverfahren“, „Photogrammetrie“) [7]. Meydenbauer (viz Obr. 3) využil fotografie k měření fasád, které do té doby představovalo často velmi riskantní ruční práci. K tomuto účelu sestrojil vlastní kameru o snímkovacím formátu 40x40 cm, kde jako nosič fotografické emulze použil skleněné desky (viz Obr. 4). Na příkaz pruské vlády vytvořil v rozmezí let 1885-1909 archiv o velikosti přibližně 16 000 obrázků významných architektonických staveb. Některé z těchto obrázků se zachovaly dodnes a jsou významným svědkem své doby. Meydenbauer vyvinul současně první grafické metody k vyhodnocení snímků, pomocí kterých sestavoval plány fasád budov.

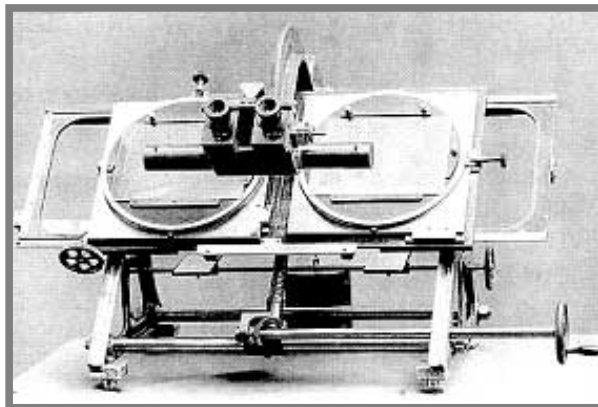


Obr. 3 Albrecht Meydenbauer (1886) [7]



Obr. 4 Kamera vlastní konstrukce [7]

Pokračovateli Meydenbauera byli Porro (Itálie, 1895) a Koppe (Německo, 1896), kteří nezávisle na sobě vyvinuli metodu fototeodolitu, která umožňovala přímé měření úhlu snímku pro snadnější řešení fotogrammetrických úloh. K dalšímu rozvoji fotogrammetrických metod přispěli Paganini (1884 – mapování Alp) a Finsterwalder, který se věnoval analytickému řešení. V tomto období se fotogrammetrie používala výhradně k topografickým účelům a k měřením budov. Na sklonku 19. století se objevily první návrhy a také první konstrukce stereoskopických zařízení. Zasloužili se o to pánové Stolze (1893, Princip prostorových měřících značek), Hauck (1894, Vývoj kartografického měřícího stereo zařízení) a zejména Pulfrich (1901, Zeiss Jena), který je autorem prvního stereokomparátoru (viz Obr. 5). Díky tomuto zařízení bylo možno zaměřit souřadnice snímku [8].



Obr. 5 Stereokomparátor dle návrhu Pulfricha, 1901 [8]

V letech 1909-1911 vznikl první stereoautograf (Orel-Zeiss), který umožňoval kontinuální zachycení topografických vrstevnic. V meziválečných letech probíhal další vývoj, který přinesl vznik řady pokrokových zařízení jako systém využívající optické projekce (Multiplex), opticko-mechanického principu (Weiss, Stereoplanigraph M-C8) atd. Po druhé světové válce začala nasazením elektronických počítačů fáze analytické fotogrammetrie. K jejímu rozvoji přispěli například Schmidt a Schut (USA 1953-1958, Porovnání analytických řešení). Od šedesátých let začíná vlna nasazení nových programů (např. Ackermann 1964, Brown 1967), které později sloužily jako základ komerčních produktů. Tyto programy dovolovaly nejen snímání obrázků z libovolných pozic, ale také simultánní výpočet kalibračních dat použitých kamer.

Počátkem osmdesátých let se oblast použití fotogrammetrie výrazně rozšířila a zároveň zesílilo použití nových opto-elektrických obrazových senzorů. Rozvoj výpočetní techniky umožňoval zpracování digitalizovaných snímků, a to především automatickou identifikaci a měření bodů ve snímcích. Zpočátku k tomu byly používány analogové kamery s rozlišením 780x580 pixelů, ze kterých se snímek digitalizoval a následně vyhodnotil v reálném čase (Real-time fotogrammetrie). Mezi první online systémy s více snímky patřil např. v roce 1987 Haggrém. Objevily se také automatické monokompaktory s vysokou přesností, které v kombinaci s kamerami o vysokém rozlišení sloužily zejména v průmyslových odvětvích. Rozšířením systému o analytické plotry bylo umožněno např. měření karosérií v automobilovém průmyslu. Požadavky na zvýšení rozlišení kamer potom dále vedly k vývoji kamer, které umožňovaly rozlišení snímku statického objektu až 6000x4500 pixelů.

Na počátku 90 let již existovaly digitální kamery s akceptovatelným rozlišením, které umožňovaly přímé použití snímku bez nutnosti zpracování fyzického snímku. Vedle klasického offline pojetí se rozmáhalo použití online systémů, a to jak stacionárních, tak mobilních měřících stanic. Objevilo se kódování měřících bodů, umožňující plně automatickou identifikaci a vyhodnocení. Užitím kombinací fotogrammetrických metod bylo umožněno měřit stále větší objemy.

V dnešní době je vedle neustálého zdokonalování snímací a vyhodnocovací techniky také trend integrace těchto systémů do oblasti specifického použití. To se týká především implementace CAD dat, datových a informačních systémů, řízení produkce, analýza kvality, 3D vizualizace atd.

1.2 Optické měřicí systémy

1.2

1.2.1 Systém Pontos

1.2.1

Stručný popis systému

Pontos je bezkontaktní, optický, 3D měřicí systém, využívající výše popsanych principů stereo fotogrammetrie. Je schopen analyzovat, vyhodnotit a dokumentovat deformace objektu, pohyby těles a dynamické chování měřených objektů [9]. Pracuje na platformě softwaru Tritop, vyvinutého německou společností GOM (Gesellschaft für optische Messtechnik, Braunschweig, 1990). Pontos umožňuje precizní dynamickou detekci polohy libovolného počtu referenčních bodů, které jsou aplikovány na měřený objekt. Systém digitálních kamer snímá změnu polohy bodů v průběhu zatížení a software potom vyhodnotí a porovná 3D souřadnice jednotlivých bodů.



Obr. 6 Dvojice kamer systému Pontos [10]

Měřicí body

Systém využívá reflexních měřicích bodů, a to pro lepší viditelnost při vysokých frekvencích snímání, kdy se úměrně zkracuje čas otevření závěrky kamery. Kruhově umístěný blesk zajišťuje dostatečné osvětlení v okamžiku otevření [10]. Body mohou být samolepící nebo magnetické a jsou aplikovány na povrch objektu nebo na jeho okolí.

Z pohledu identifikace bodu systémem rozeznáváme dva typy bodů (viz Obr. 7):

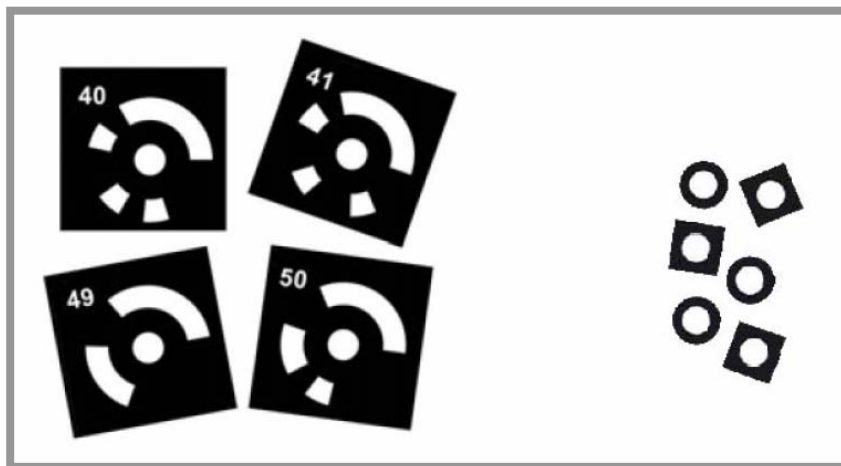
- *kódované*
- *nekódované*

Kódované body

Tento typ bodu je systémem automaticky identifikován a je mu přiřazeno jedinečné označení. Kód je umístěn v kruhu okolo samotného bodu a odpovídá binárnímu kódování [12]. Nevýhodou je větší plocha, kterou terčik zabírá.

Nekódované body

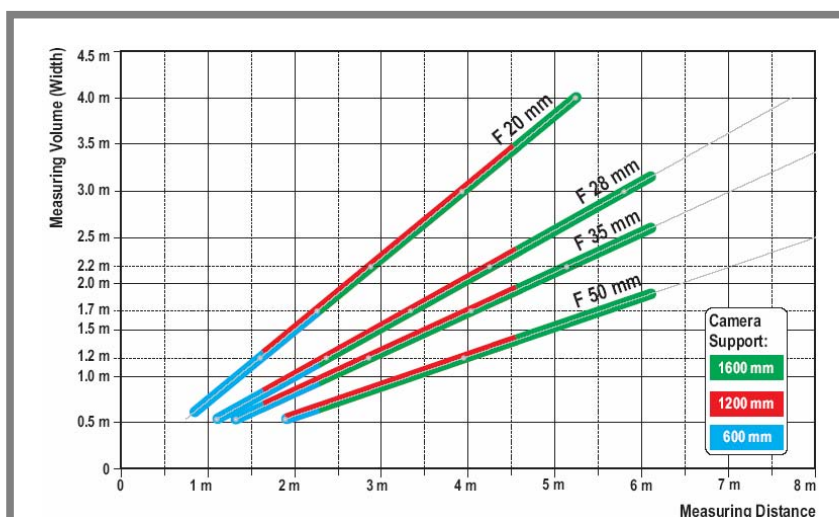
Výhodou nekódovaných bodů je jejich snadná produkce a velikost plochy, kterou zabírají. Identifikace je založena na jejich poloze.



Obr. 7 Kódované a nekódované body [10]

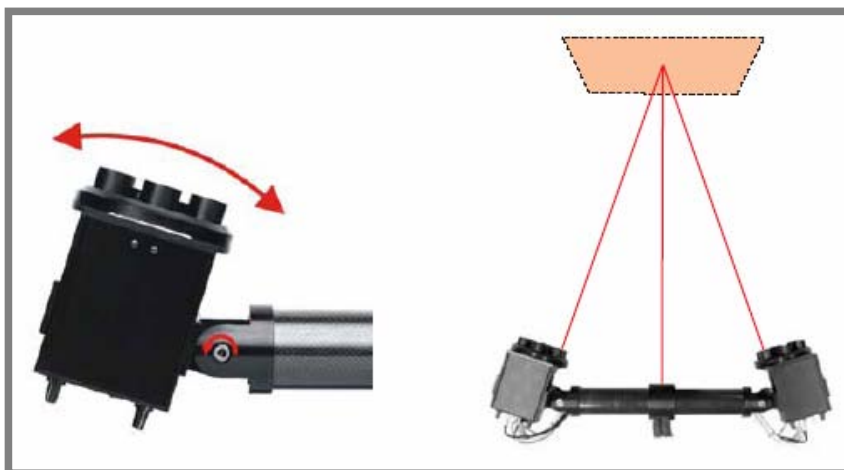
Postup při měření

Důležitým aspektem, který je potřeba brát v úvahu již při samotné přípravě měření, je objem měřeného objektu. K systému Pontos jsou standardně dodávány 3 tyče různých délek (*Camera support*), které slouží k pevnému spojení kamer. V závislosti na daném měřicím objemu potom zvolíme vhodnou tyč a příslušnou vzdálenost kamer od objektu (viz Obr. 8)



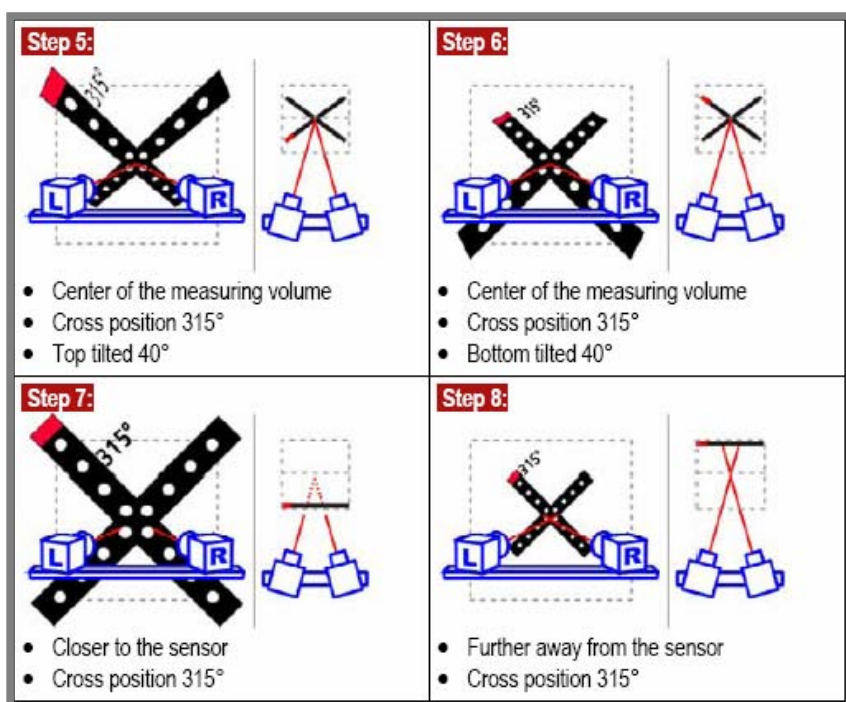
Obr. 8 Měřicí vzdálenost pro různé typy objektivů [11]

Po určení správné vzdálenosti kamer je nutné nastavit úhel natočení kamer tak, aby se paprsek pomocného laseru každé kamery setkal s paprskem laseru umístěným uprostřed tyče. (viz Obr. 9)



Obr. 9 Určení úhlu natočení kamer [11]

Dalším krokem je zaostření obou kamer, správné nastavení clon a následná kalibrace kamer. Tato činnost slouží k určení parametrů vnitřní orientace kamery (viz kap. 1.1.3) a využívá kalibračního kříže. Ten je složen ze dvou pevně smontovaných desek, přičemž na každé z nich je určitý počet kódovaných bodů v přesně dané geometrické pozici. Snímáním tohoto kříže v různých předem definovaných polohách dochází k automatickému vyhodnocení a vypočtení parametrů (viz Obr. 10).



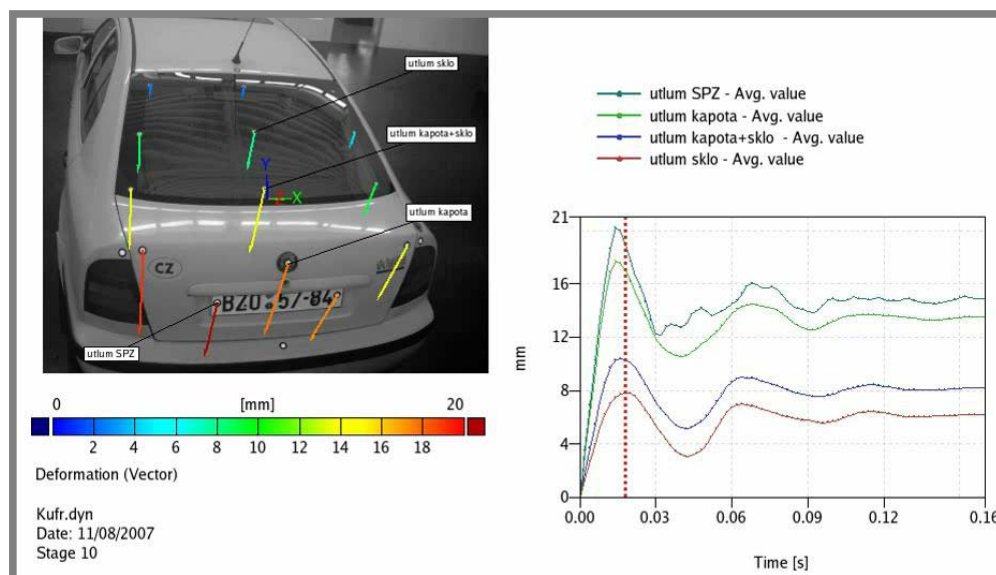
Obr. 10 Příklad pozic kříže při procesu kalibrace [11]

Výhody Pontosu oproti konvečním zařízením měřícím změnu polohy jsou:

- Jednoduchá příprava vzorku (odpadá složitá montáž senzorů posunutí a jejich kabeláže)
- Ultra-lehké měřicí značky (nemají vliv na měřený objekt, např. v aerodynamickém tunelu)
- Snímkovací frekvence nezávislá na počtu značek
- Přizpůsobivé spouštění snímání
- Záznam analogového signálu
- Lhostejnost k okolním vlivům jako vibrace a změny osvětlení
- Snadné přizpůsobení na různé měřicí objemy a úlohy

Příklady možných aplikací:

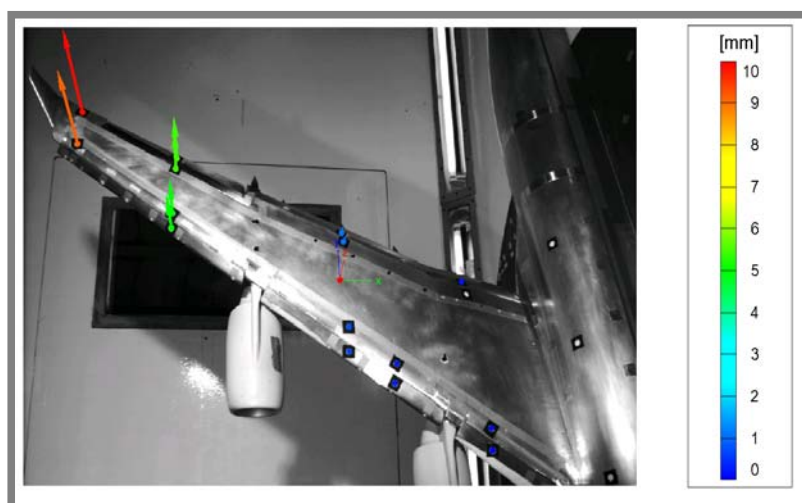
- Dynamické chování komponent (viz Obr. 11, Obr. 12)
- Poloha komponent v aerodynamickém tunelu
- Deformace při aerodynamickém zatížení (viz Obr. 13, Obr. 14)
- Crash testy (viz Obr. 15)
- Drop testy (viz Obr. 16)
- Vibrační analýzy
- Verifikace simulací



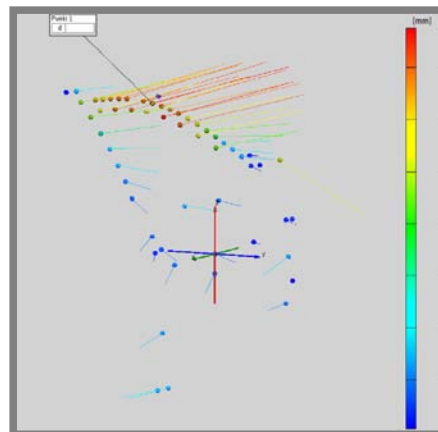
Obr. 11 Útlum pátých dveří Škoda Octavia



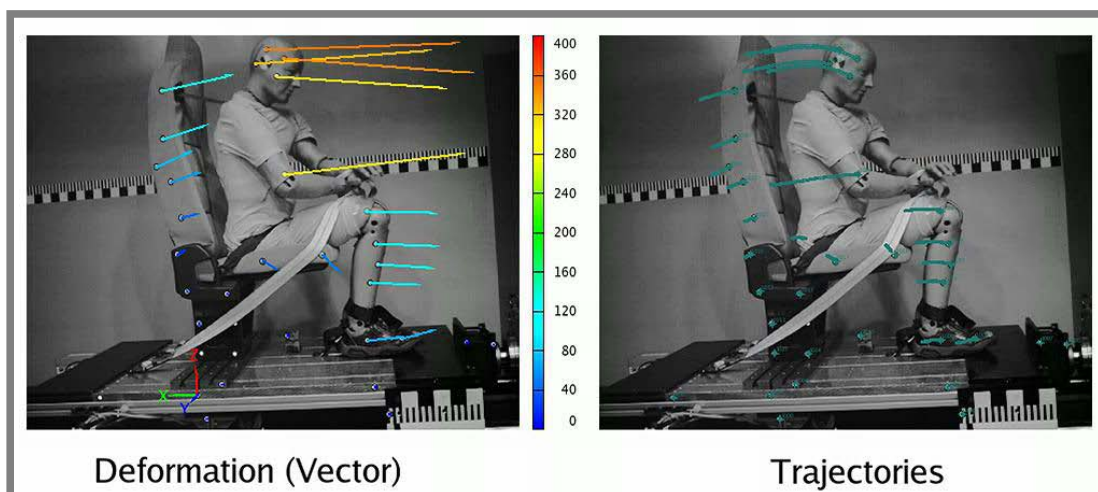
Obr. 12 Měření odezvy listu vrtule v čase při rotaci podle vstupního signálu [13]



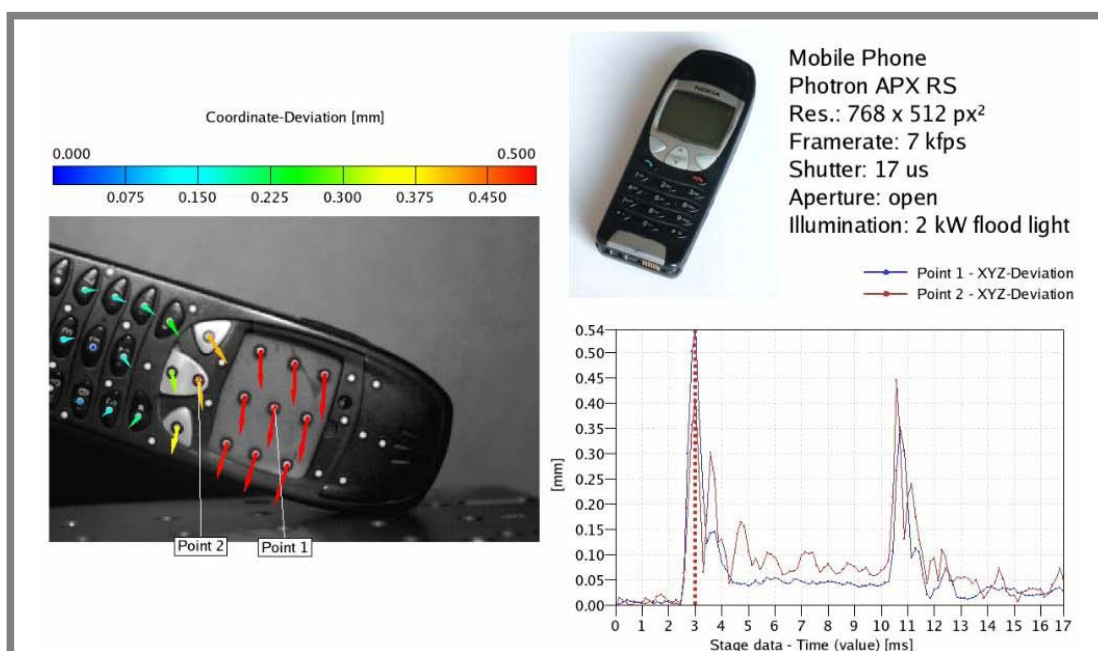
Obr. 13 Deformace křídla v aerodynamické tunelu při rychlosti vzduchu 70m/s [10]



Obr. 14 Vychýlení rámu okna v aerodynamickém tunelu [14]



Obr. 15 Simulovaný náraz při 25km/h [10]



Obr. 16 Drop test mobilního telefonu [10]

Parametry systému Pontos

Konfigurace systému

Rozlišení kamer (2M)

Rozlišení kamer (4M)

Rozlišení kamer (HS)

Snímkovací frekvence

Měřicí objemy

Přesnost

2M / 4M/ High Speed (HS)

1600 x 1200 pixelů

2048 x 2048 pixelů

1280 x 1024 pixelů

500 Hz při 1280 x 1024 pixelů

8000 Hz při 1280 x 64 pixelů (snížení rozlišení až na 1/16)

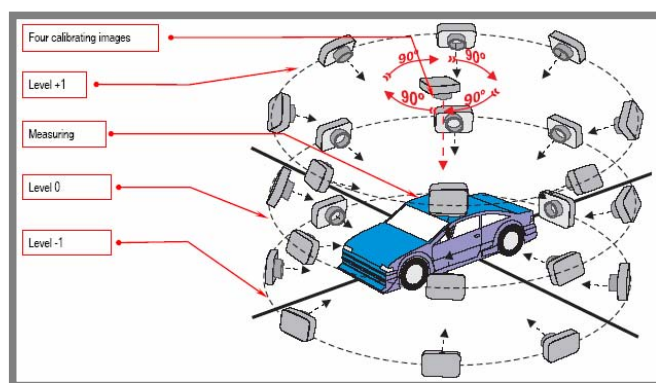
od 0.5x0.4 m² do 2.5x2 m²

0.01 až 0.05 mm

1.2.2 Systém Tritop

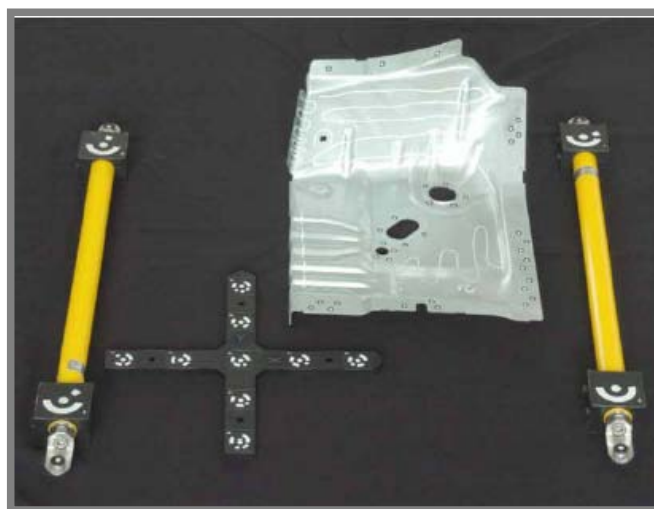
Stručný popis systému

Výše popsaný systém Pontos plně vychází ze systému Tritop, který svým zařazením odpovídá jednosnímkové real-time fotogrammetrii. Používá tedy jedinou kameru, kterou je měřený objekt snímán, a to postupně z několika úrovní (viz Obr. 17). Principem vyrovnání bloku projekčních svazků pak dochází k určení souřadnic jednotlivých bodů. Systém je schopen analyzovat statické a quasi-statické deformace a díky své vysoké mobilitě je vhodným doplňkem jak systému Pontos, tak i jiných optických měřicích systémů na společné platformě GOM [10]. Před samotným snímáním se neprovádí kalibrace pomocí skupiny bodů, jako je tomu



Obr. 17 Snímání 3D objektu pomocí Tritop kamery [15]

u systému Pontos. Výpočet kalibračních dat je proveden až po nasnímání celé skupiny obrázků s tím, že první čtveřice je provedena při pootočení vždy o 90° okolo optické osy fotoaparátu. Jako měřítko, které přiřazuje poměrným vzdálenostem bodů v prostoru jednotkový charakter, zde slouží takzvané *měřítkové tyče* (*scale bare*) (viz Obr. 18). Pro úspěšný výpočet prostorových souřadnic měřených bodů je nutný dostatečný počet snímků z rozdílných pozic a dostatečný překryv snímků. Tím se rozumí skutečnost, že na každém snímku musí být zaznamenán minimální počet kódovaných bodů (min. 8), díky kterým dojde ke „svázání“ snímků (viz Obr. 18).



Obr. 18 Rozložení 3D objektu při snímání [15]

2. FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

Stanovení souřadného systému při optickém deformačním měření je velice důležitý úkon. Pomocí správně určeného souřadného systému lze naměřené charakteristiky, ať už celého vozu, nebo jen jeho komponent, porovnat s CAD daty a výsledky virtuálních simulací (pevnostně-deformační analýzy, proudění a obtékání, kinematické simulace atd.).

V rámci dynamické zkušebny podniku Škoda Auto a. s. se souřadný systém při jednotlivých měřeních určoval pouze přibližně. Jeden z příkladů, jak docházelo k jeho určení je na Obr. 19.



Obr. 19 Stávající princip určování souřadného systému

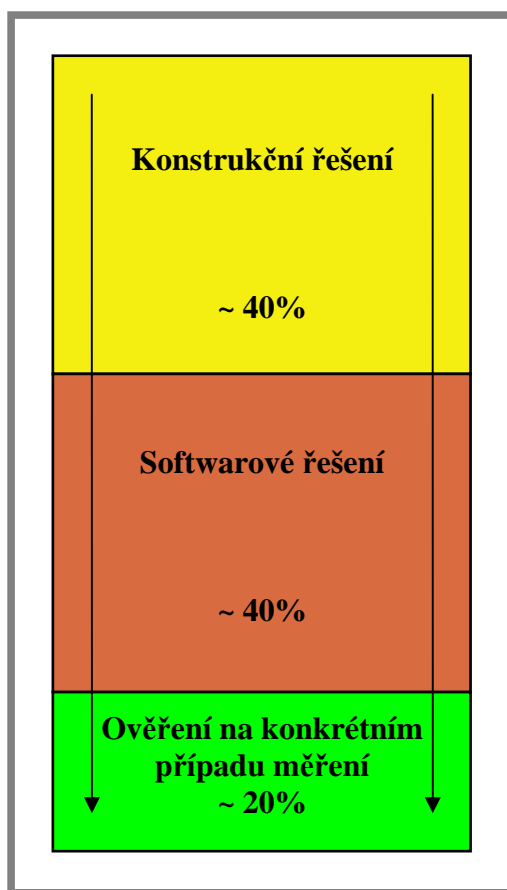
Mezi vozidlo a soustavu kamer byly postaveny stojany, u nichž se předpokládala kolmost vůči základně (zemi). Pomocí bodů, umístěných na těchto stojanech, pak bylo možno přibližně určit směr osy z souřadného systému vozidla. Při použití tohoto způsobu bylo předpokládáno, že podložka pod autem je rovná, a nebylo také bráno v úvahu možné naklonění vozidla, způsobené například podhuštěním pneumatik, špatnými tlumiči apod. Navíc nebylo možno definovat další směry souřadného systému.

Cílem diplomové práce byl návrh a realizace řešení, které by umožňovalo určení polohy a orientace souřadného systému bez výše popsaných problémů.

3. VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

3

Hlavním cílem práce je vytvořit postup při ustavování souřadného systému (dále jen s.s.) pro systém Pontos a to s ohledem na flexibilitu, jednoduchost a technické možnosti dynamické zkušebny podniku Škoda Auto. K dosažení tohoto cíle jsem si stanovil několik dílčích činností, které je potřeba zpracovat viz Obr. 20.



Obr. 20 Vymezení cílů diplomové práce

Popis jednotlivých činností:

- a) **Konstrukční řešení:**
Návrh a konstrukce přípravků, které umožní ustavení souřadného systému.
- b) **Softwarové řešení:**
Naprogramování systému Pontos tak, aby došlo k automatické identifikaci přípravků, výpočtu jejich geometrie a následnému určení s.s.
- c) **Ověření na konkrétním případě měření:**
Účast na měření v dynamické zkušebně Škoda Auto a ověření funkčnosti konstrukčního a softwarového řešení.

4. NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Abych mohl přistoupit k návrhu metodického přístupu k řešení, je potřeba zamyslet se nad samotným postupem při použití přípravku uživatelem. Obr. 21 ukazuje činnosti, které uživatel bude muset vykonat.



Obr. 21 Workflow

Popis jednotlivých činností:

- a) **Kalibrace přípravků**
Nutno provést ještě před samotným měřením. Slouží ke zjištění geometrie přípravků.
- b) **Ustavení přípravků**
Montáž přípravku na měřený objekt.
- c) **Snímání měřeného objektu**
Snímání celého objektu obsahujícího měřicí body včetně přípravku.
- d) **Vyhodnocení**
Zpracování dat v počítači zahrnující identifikaci přípravků, výpočtu jejich geometrie a následnému určení souřadného systému.

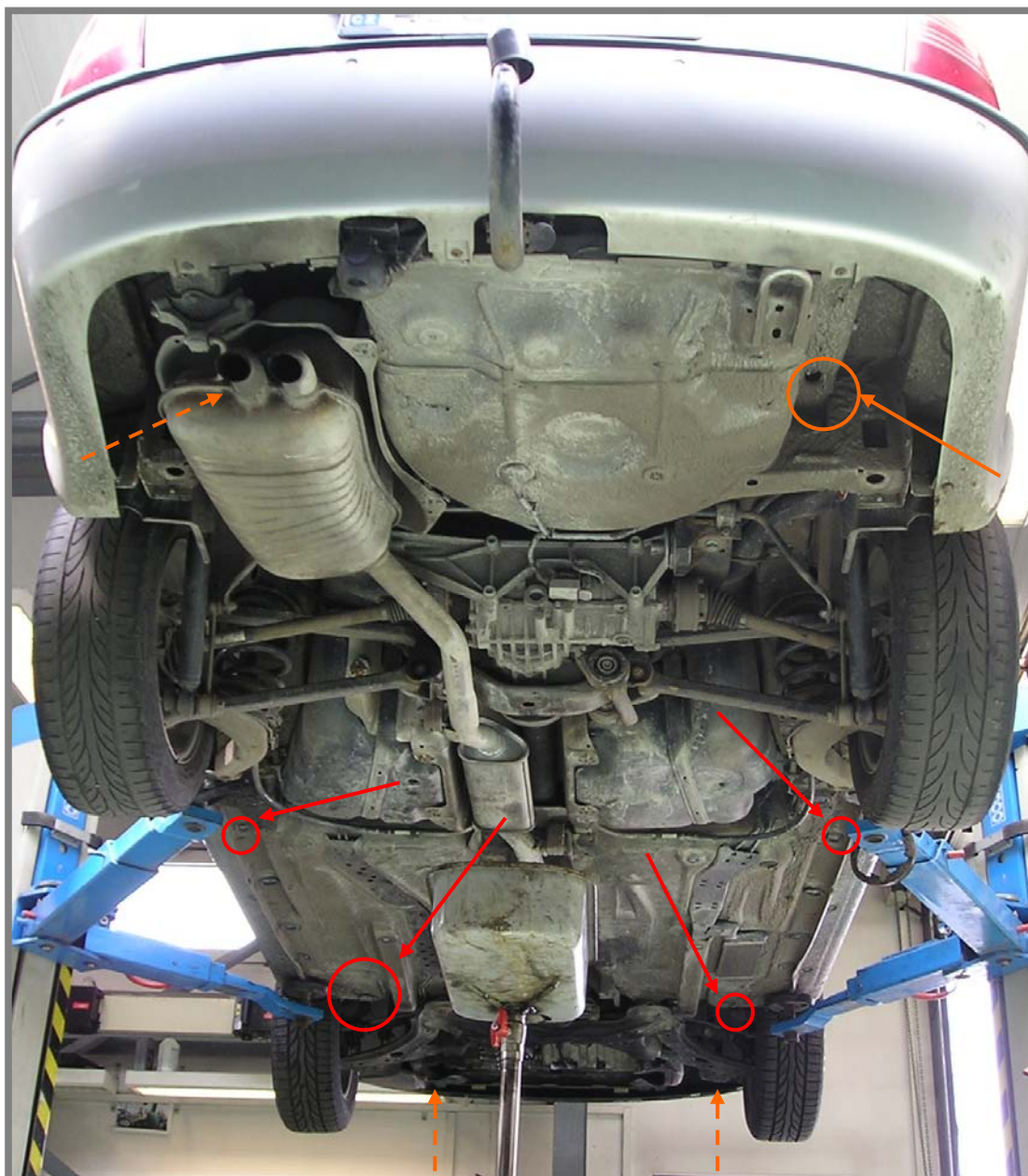
Pro zajištění chodu jednotlivých činností je potřeba zvládnout úkoly popsané v dalším textu.

5. NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY 5

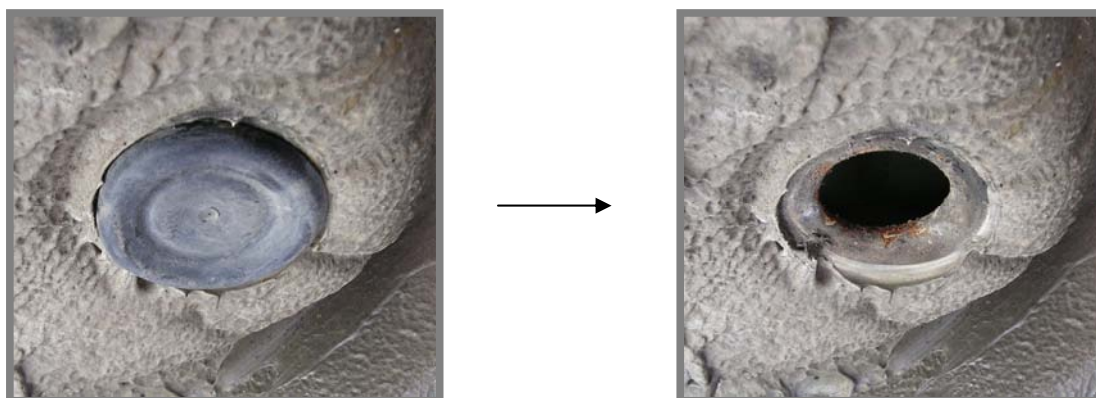
V automobilovém průmyslu je dnes běžné využití pásové výroby. Kostra automobilu je postupně unášena přes mnoho automatizovaných stanovišť, na kterých dochází k montáži prvků. Tyto automatizované pracoviště jsou vybaveny souřadnicově řízenými mechanismy, plnícími svou specifickou funkci (např. bodové svary).

K charakteristickým bodům karoserie vozu patří 4 referenční body, umístěné na podélnících karoserie (2 na podélnících vpředu, 2 na podélnících vzadu) [16]. Tyto body jsou v posloupnosti pásové výroby přítomné už na samotném počátku a slouží k určení výchozích souřadnic výše zmíněných mechanismů. Dalšími charakteristickými body karoserie jsou 4 body umístěné na spodní straně prahů karoserie. Tyto slouží k manipulaci s karosérií při výrobě a jejich souřadnice jsou také známy. Rozmístění bodů je znázorněno na Obr. 22 (oranžové ukazatele značí body na podélnících, červené body na prazích karoserie).

Nabízí se tedy myšlenka využití některých z této čtveřice bodů a jejich pevného vztahu k souřadnému systému vozu. Zde však narážíme na problém s umístěním bodů a to proto, že nejsou při běžném postavení vozu viditelné. Bylo by možné využít např. zvedací stoličky, ale to by bylo z hlediska mobility měřicího systému nepraktické a často také technicky nerealizovatelné, jako např. při měření vozu v aerodynamickém tunelu.



Obr. 22 Rozmístění bodů



Obr. 23 Detail bodu (krytý pryžovou ucpávkou a odkrytý)

Navrhl jsem tedy adaptéry, umožňující určení vztahu referenčního bodu, který není v běžném postavení vozu viditelný (dále jen *neviditelný bod*) k soustavě bodů, které jsou při měření viditelné. Na Obr. 24 a Obr. 25 je znázorněno umístění adaptérů pro obě varianty čtveřic referenčních bodů.



Obr. 24 Umístění adaptérů na podélnících karoserie (zobrazeny pouze 2 adaptéry)



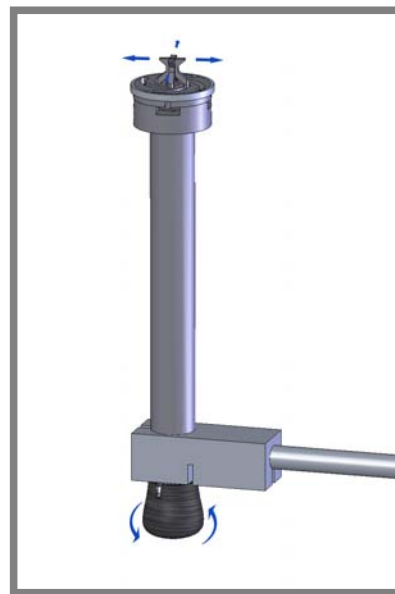
Obr. 25 Umístění adaptérů pod prahy karoserie (zobrazeny pouze 2 adaptéry)

5.1 Varianta č.1 – adaptér pro referenční body na podélnících karoserie

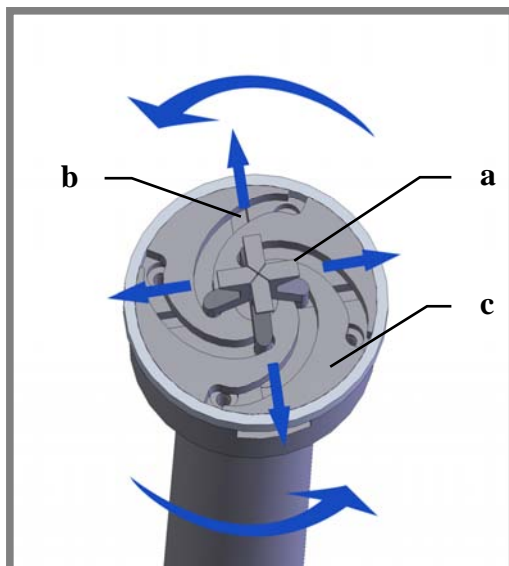
Při návrhu tohoto adaptéru jsem byl nucen vzít v úvahu fakt, že rozměry děr pro referenční body se liší u jednotlivých typů sériově vyráběných vozů Škoda. Proto jsem navrhl upínací mechanismus, který umožňuje uchycení adaptéru do děr o průměru 20 mm až 35 mm, což zahrnuje rozmezí velikostí těchto děr, viz Obr. 26 a Obr. 27.



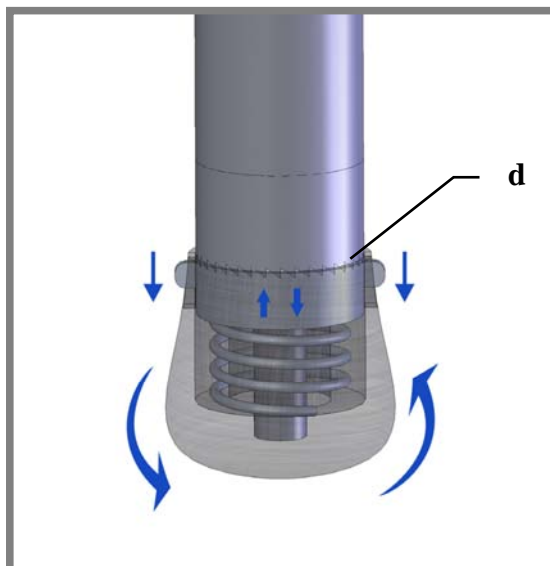
Obr. 26 Adaptér pro díry na podélnících



Obr. 27 Detail adaptéru



Obr. 28 Detail upínací hlavy adaptéru



Obr. 29 Detail úchopu ovládání upínací hlavy

Upínací hlava adaptéru se skládá ze 3 hlavních členů (viz Obr. 28):

- a) kleštiny (4x)
- b) vodícího členu, určujícího směr pohybu kleštiny směrem od/do středu
- c) hybného členu, přenášejícího moment, vyvinutý uživatelem na úchop

Hybný člen je pevně spojen s úchopem adaptéru (Obr. 29), při jehož otáčení dochází k pohybu kleštin. Při otáčení ve smyslu rozevření kleštin je jejich zpětný pohyb zamezen sestavou rohatka – západka (Odkaz d). Pro uvolnění kleštin a jejich zpětné zatažení je poté nutné zatlačit rohatku směrem dolů a otočit úchopem proti smyslu uzavírání.

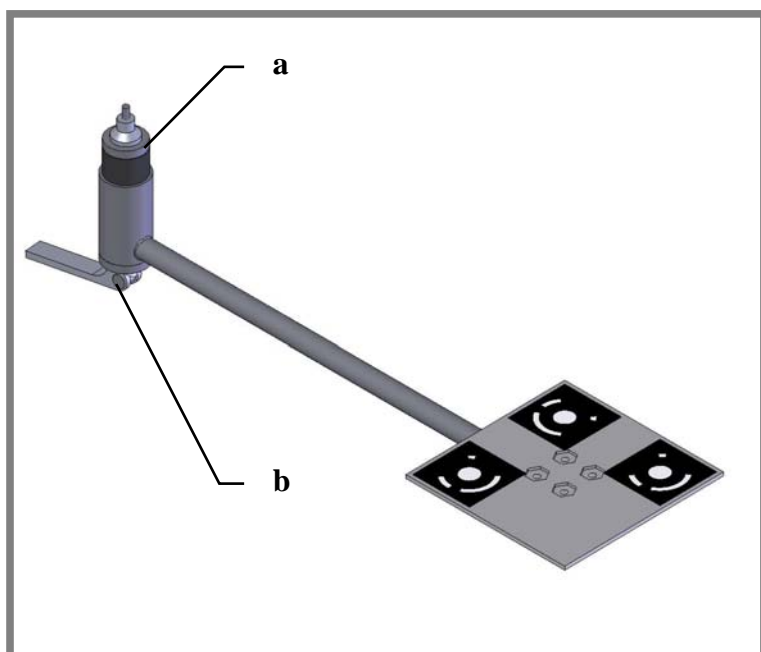
5.2 Varianta č.2 – adaptér pro referenční body pod prahy karoserie

5.2

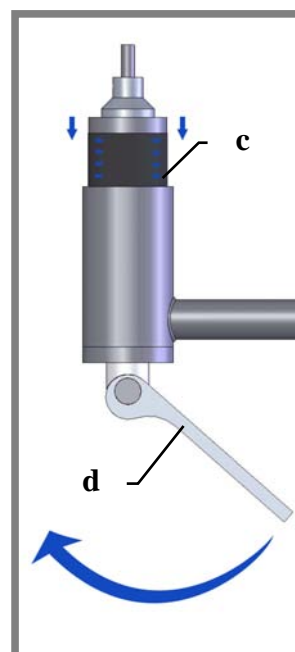
Při návrhu druhé varianty adaptéru jsem vzal do úvahy fakt, že rozměry děr pro tyto referenční body jsou stejné u všech typů sériově vyráběných vozů Škoda (viz Tab. 1).

Tab. 1 Průměry děr

Pozice	ø [mm]
přední	$30,5^{+0,2}_0$
zadní	$30,0^{+0,2}_0$



Obr. 30 Adaptér pro díry pod prahy karoserie



Obr. 31 Detail adaptéru

Upínací mechanismus adaptéru se skládá ze dvou hlavních členů (viz Obr. 30):

- a) extenzní válec
- b) soustava prvků působících na extenzní válec

Po zasunutí adaptéru do příslušné díry a dosednutí dorazové plochy (viz Obr. 31, c), je zapotřebí zatáhnout páku (d). Díky vačkovému uchycení [17] dojde ke stlačení extenzního válce, čímž je adaptér zafixován ve své poloze.

5.3 Zhodnocení variant

Při návrhu obou variant byl kladen důraz na snadnou manipulaci uživatelem a nenáročné uchycení adaptéru [18], [19]. Výhody a nevýhody jednotlivých řešení jsou vyvedeny v následující tabulce:

Tab. 2 Porovnání variant

Varianta č.1	Varianta č.2
+ Umístění děr na podélnících, které jsou jedny z nejtužších míst na karoserii	- Nižší tuhost karoserie (možné předešlé deformace)
- Horší dostupnost děr (nutná demontáž plastových dílců a výfuku)	+ Snadná dostupnost pod prahy karoserie
- Vyšší náklady na výrobu	+ Nižší náklady na výrobu
- Vyšší náklady na polotvar	+ Nižší náklady na polotovary (možnost využití standardizovaných prvků)

S ohledem na zhodnocení převažujících výhod a po konzultaci se zadavatelem bylo přistoupeno k výrobě varianty č.2.

6. KONSTRUKČNÍ A SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ

6

6.1 Konstrukční řešení

6.1

6.1.1 Vačkový mechanismus

6.1.1

Při návrhu konečné varianty přípravků jsem se v rámci snížení nákladů pokusil vyžít na trhu dostupných prvků. Místo nákladné výroby vačkového uchycení a páky jsem použil standardní rychloupínák pro upnutí kola do rámu jízdních kol (viz Obr. 32).



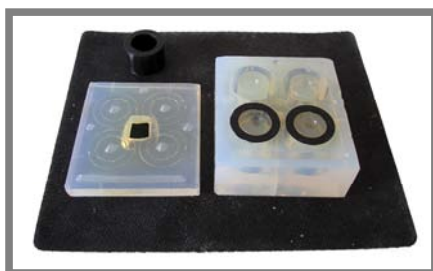
Obr. 32 Detail adaptéru

Při stlačení páky dojde působením vačky ke stlačení extenzního válce o 2mm, což je dostatečná hodnota ke zvýšení jeho průměru tak, aby došlo k bezpečné fixaci celého přípravku v díře.

6.1.2 Extenzní válec

6.1.2

Při návrhu tohoto členu sestavy byla také snaha pořídit tento prvek jako nakupovaný díl. Na trhu jsem však nenašel adekvátní řešení a bylo potřeba tento prvek vyrobit. Využil jsem technologie vakuového lití do silikonové formy, kterou podnik disponuje (viz Obr. 33). Jako první krok jsem vyrobil mastermodel válce (4 kusy) pomocí 3D tiskárny podle CAD předlohy. Následně jsem všechny tyto kusy vložil do předem připraveného tvarového přípravku a zalil směsí silikonu. Po vyvakuování a vytvrdnutí směsi došlo k otevření formy jejím rozříznutím a vytvoření technologických děr (odvzdušnění, vtok...). S pomocí takto připravené formy jsem byl schopen vyrobit přesnou tvarovou kopii mastermodelu, přičemž jsem mohl vybírat z široké nabídky pryžových materiálů. S ohledem na požadované vlastnosti extenzního válce (pružný, ale dostatečně tvrdý kvůli opotřebení) jsem zvolil materiál s tvrdostí 70 Shore A, který se následně při testech velmi osvědčil.



Obr. 33 Silikonová forma pro vakuové lití

6.2 Softwarové řešení

6.2.1 Python

Všechny systémy firmy GOM (ATOS, TRITOP, ARAMIS, PONTOS, ARGUS) jsou vyvinuty za pomoci programovacího jazyka Python, což je hybridní jazyk (nebo také *víceparadigmatický*). Znamená to, že při psaní programů umožňuje používat nejen objektově orientované paradigma, ale také procedurální a v omezené míře i funkcionální. Díky tomu má vynikající vyjadřovací schopnosti. Kód programu je ve srovnání s jinými jazyky krátký a dobře čitelný [20], [23].

Jazyk je vyvíjen jako *open source*¹ projekt, který zdarma nabízí instalační balíky do všech běžných OS jako jsou Windows, Unix a Mac OS. V systému Linux je Python součástí základní instalace. Vývoj jazyka zajišťuje Python Software Foundation a jeho počátky jsou spojeny s rokem 1990 a jménem Guido van Rossum.

Princip příkazů

Každý GOM systém je tvořen souborem příkazů, které uživatel zadává buď prostřednictvím grafického rozhraní, nebo spuštěním makra, které příkazy obsahuje [24].

Typický příklad jednoduchého příkazu:

```
import gom          #importuje knihovnu předprogramovaných příkazů GOM2
gom.script.sys.load_file  #otevře soubor se zadanou cestou
(file='/home/demo/test.session')
```

Filozofie Pythonu

Výše zmíněné vlastnosti jazyka Python jsou jen nástinem jeho charakteristiky. Existuje celá řada publikací zabývajících se jeho podrobným popisem. Ze všech existujících popisů ([20], [21], [22]) bych rád zmínil pouze jeden, a to ten, který je přímo zabudován ve struktuře jazyka.

Po zadání příkazu **import this** v příkazovém řádku se vypíše 19 hlavních principů jazyka, které sepsal jeden z dlouholetých vývojářů Pythonu Tim Peters:³

Beautiful is better than ugly.
 Explicit is better than implicit.
 Simple is better than complex.
 Complex is better than complicated.
 Flat is better than nested.
 Sparse is better than dense.
 Readability counts.
 Special cases aren't special enough to break the rules.
 Although practicality beats purity.
 Errors should never pass silently.
 Unless explicitly silenced.
 In the face of ambiguity, refuse the temptation to guess.
 There should be one-- and preferably only one --obvious way to do it.

¹ Open Source – otevřený zdrojový kód (technická i legální dostupnost)

² text, kterému na řádku předchází znak # je tzv. zakomentovaný (při čtení skriptu není brán v úvahu)

³ Pro zachování autentičnosti je text ponechán v originálním znění, volný překlad viz příloha A.

Although that way may not be obvious at first unless you're Dutch.

Now is better than never.

Although never is often better than **right** now.

If the implementation is hard to explain, it's a bad idea.

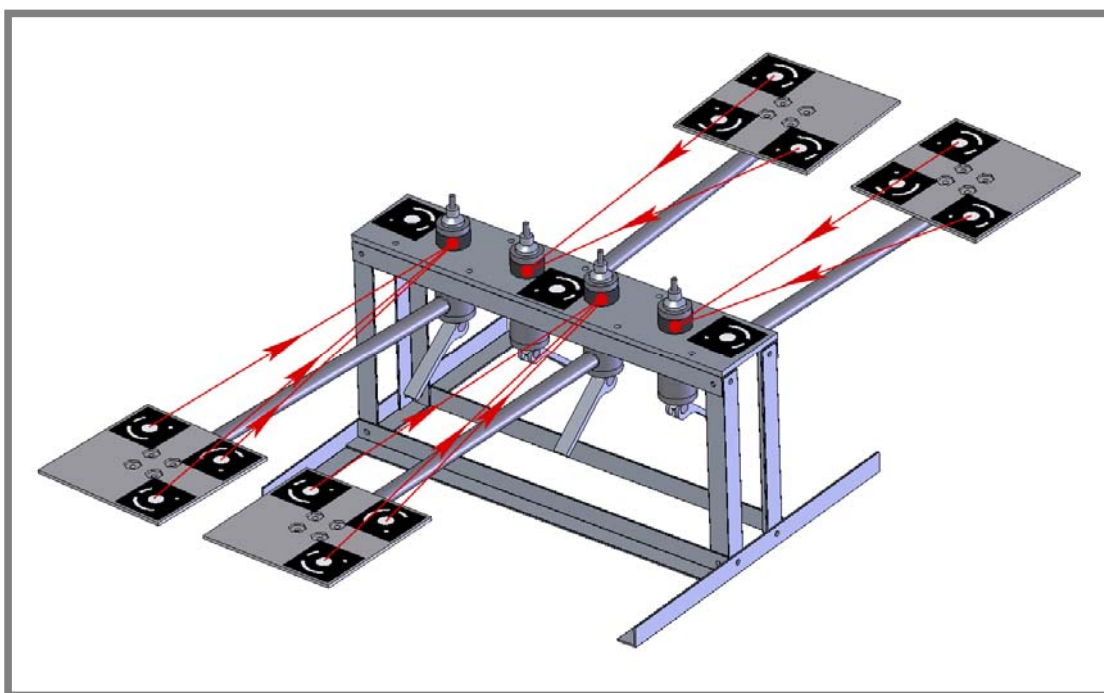
If the implementation is easy to explain, it may be a good idea.

Namespaces are one honking great idea -- let's do more of those!

6.2.2

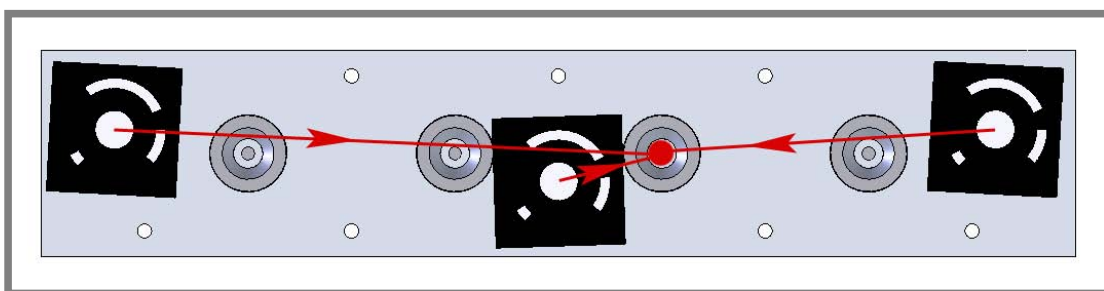
6.2.2 Úvaha nad softwarovým řešením - kalibrace adaptérů a stojanu

Jak vyplývá z kapitoly 5, před samotným použitím přípravku je nutné provést jejich kalibraci. Pro tento úkon jsem navrhl tzv. *kalibrační stojan*, který umožňuje určení vztahu *neviditelného* referenčního bodu k viditelným pomocným bodům (viz Obr. 34).



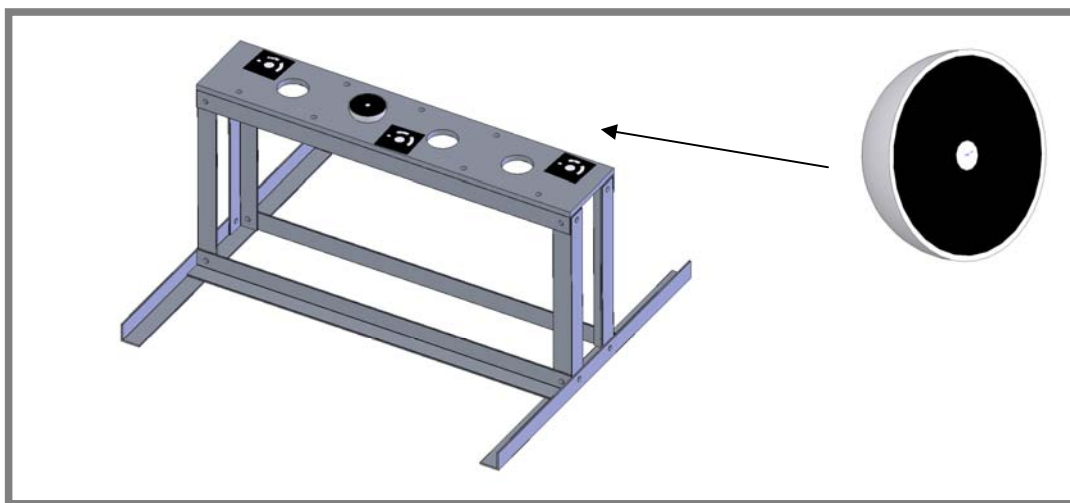
Obr. 34 Kalibrační stojan

Určení polohy *neviditelného* referenčního bodu, jehož pozici stojan simuluje, je zajištěno přepočtem pozic 3 kódovaných bodů umístěných na povrchu desky stojanu (viz Obr. 35)



Obr. 35 Vrchní pohled na desku stojanu

Aby bylo možné přesně určit vzájemnou polohu *neviditelného* bodu na stojanu a tří kódovaných bodů z Obr. 35, je za potřeby provést kalibraci stojanu. K tomuto účelu jsem použil kulový adaptér přesné výroby (výrobce GOM), který je tvořen polokoulí, v jejímž geometrickém středu leží střed bílého bodu umístěného na černém podkladu (viz Obr. 36). Po vložení tohoto adaptéru do příslušné díry, nasnímání série obrázků a následném spuštění vytvořeného makra dojde k přesnému vymezení pozice bodu na kulovém adaptéru (promítnutého do roviny stojanu) vůči 3 kódovaným bodům na stojanu.

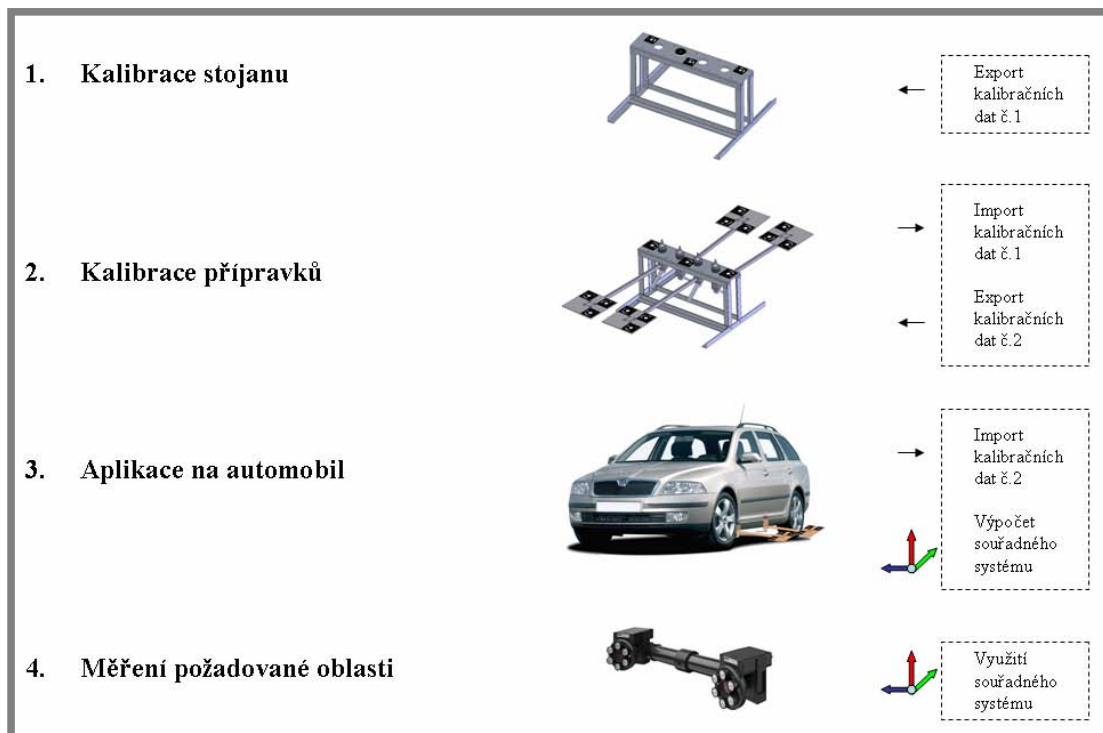


Obr. 36 Kulový adaptér (GOM) v kalibračním stojanu

Výsledkem kalibrace stojanu je stejně jako u kalibrace přípravku balík kalibračních dat, který je vyexportován mimo systém v podobě textového souboru. V dalším průběhu činnosti jsou tyto data zpětně vyvolána a použita při výpočtech geometrií.

6.2.3 Popis činností při určování souřadného systému

Obr. 37 znázorňuje činnosti, které musí uživatel vykonat, a navazuje tak na kapitolu 5.

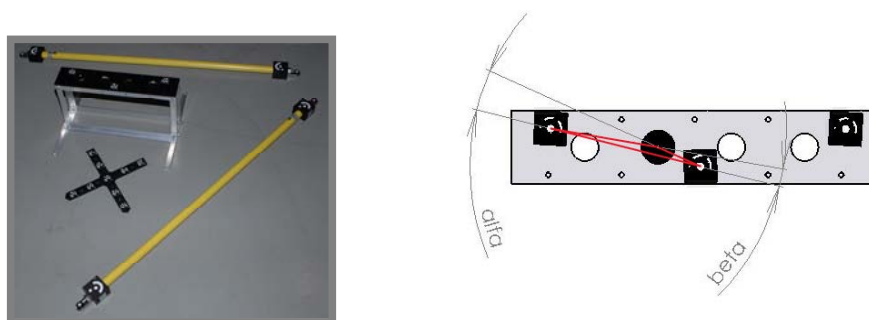


Obr. 37 Workflow

Popis jednotlivých činností:

a) Kalibrace stojanu

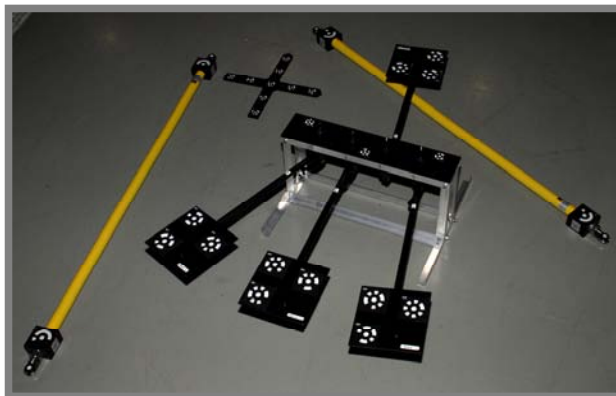
Je prováděna za účelem popsaným v 6.2.2. Pořizují se snímky kalibračního stojanu společně s kulovým adaptérem, měřítkovými tyčemi a pomocnými kódovanými body, které zvyšují počet kódovaných bodů nutných pro „svázání“ snímků. Po výpočtu pozic bodů systémem Tritop následuje spuštění prvního ze tří maker. Vývojový diagram výpočtu je znázorněn na Obr. 41. Exportovaná kalibrační data obsahují vždy dva údaje o hodnotách úhlů (alfa, beta) mezi spojnicemi promítnutého bodu a dvou sousedních kódovaných bodů (viz Obr. 38). Tento krok je možné provést jak pro každou díru zvlášť, tak pro všechny díry najednou (při dostatečném počtu kulových adaptérů).



Obr. 38 Kalibrace stojanu

b) Kalibrace přípravků

Je prováděna za účelem zjištění aktuální geometrie každého přípravku. Pořizují se snímky všech přípravků upnutých v kalibračním stojanu, měřítkových tyčí a pomocných kódovaných bodů (viz Obr. 39).



Obr. 39 Kalibrace přípravků

Po výpočtu pozic bodů systémem Tritop následuje spuštění druhého makra (Obr. 42). V průběhu výpočtu dojde nejprve k importu kalibračních údajů z předešlého kroku, poté následuje zpětný výpočet polohy díry (*neviditelného* bodu) a export kalibračních údajů pro každý přípravek. Jedná se o hodnoty 2 úhlů, které svírají roviny spojující vždy *neviditelný* bod a různou dvojici bodů na přípravku. Další exportovaný údaj je hodnota normálové vzdálenosti *neviditelného* bodu od roviny bodů na přípravku. V obou těchto krocích kalibrace dochází ke kontrole exportovaných údajů srovnáním hodnoty každého údaje s jeho předpokládanou hodnotou v určitých mezích. (Např. úhel alfa má hodnotu $5,456^\circ$, předpokládaná hodnota je $3^\circ \div 7^\circ$, tzn. exportovaný údaj je v pořádku, v opačném případě proběhne výpočet znovu).

c) Aplikace na automobil

Po provedení předchozích dvou kalibračních kroků může uživatel přistoupit k demontáži přípravků ze stojanu a aplikaci do příslušné díry na prazích karoserie vozu. Současně aplikuje měřítkové tyče, pomocné kódované body (pro „svázání“ snímků) a měřicí body pro systém Pontos.

Po nasnímání takto připraveného objektu spustí uživatel poslední makro, které nejprve importuje kalibrační údaje přípravků z předchozího kroku, poté automaticky určí polohu *neviditelných* referenčních bodů na karoserii a z nich



Obr. 40 Aplikace na automobil

dopočte polohu a orientaci souřadného systému vozu.

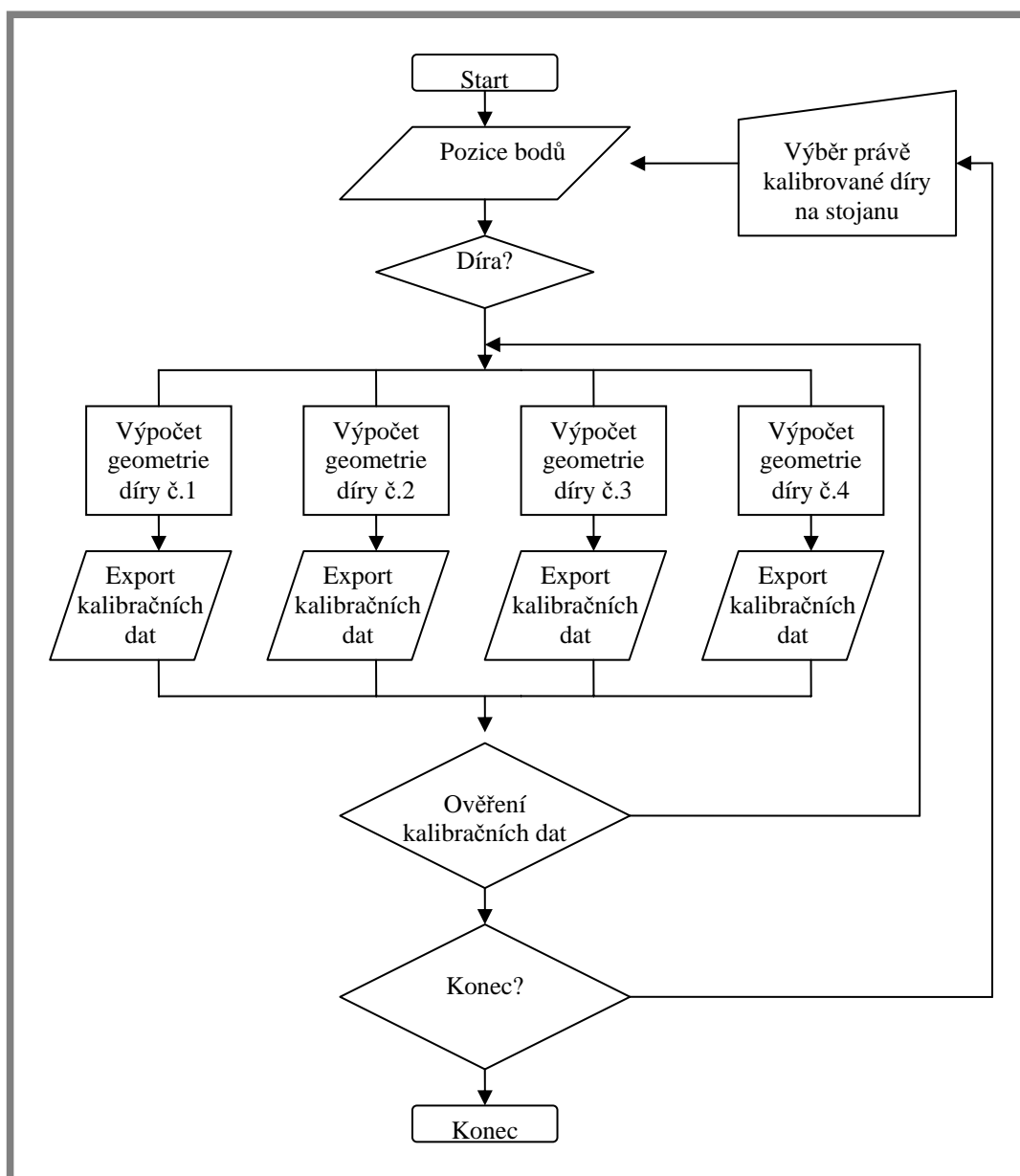
d) Měření požadované oblasti

Výsledkem předchozího kroku je soustava všech aplikovaných bodů (pomocných i měřících), jejichž poloha vůči souřadnému systému vozu je pevně definována. Je tedy možno snímat předem vybranou oblast, na které jsou umístěny měřící body, kamerami systému Pontos a při následném vyhodnocení rozložit složky deformace do jednotlivých směrů souřadného systému. Poloha bodů z předchozího kroku je přitom brána jako výchozí klidový stav. Pomocné objekty jako adaptéry, měřítkové tyče a pomocné body již mohou být odstraněny a nebrání tak např. měření v aerodynamickém tunelu.

6.2.4 Vývojové diagramy pro jednotlivá makra

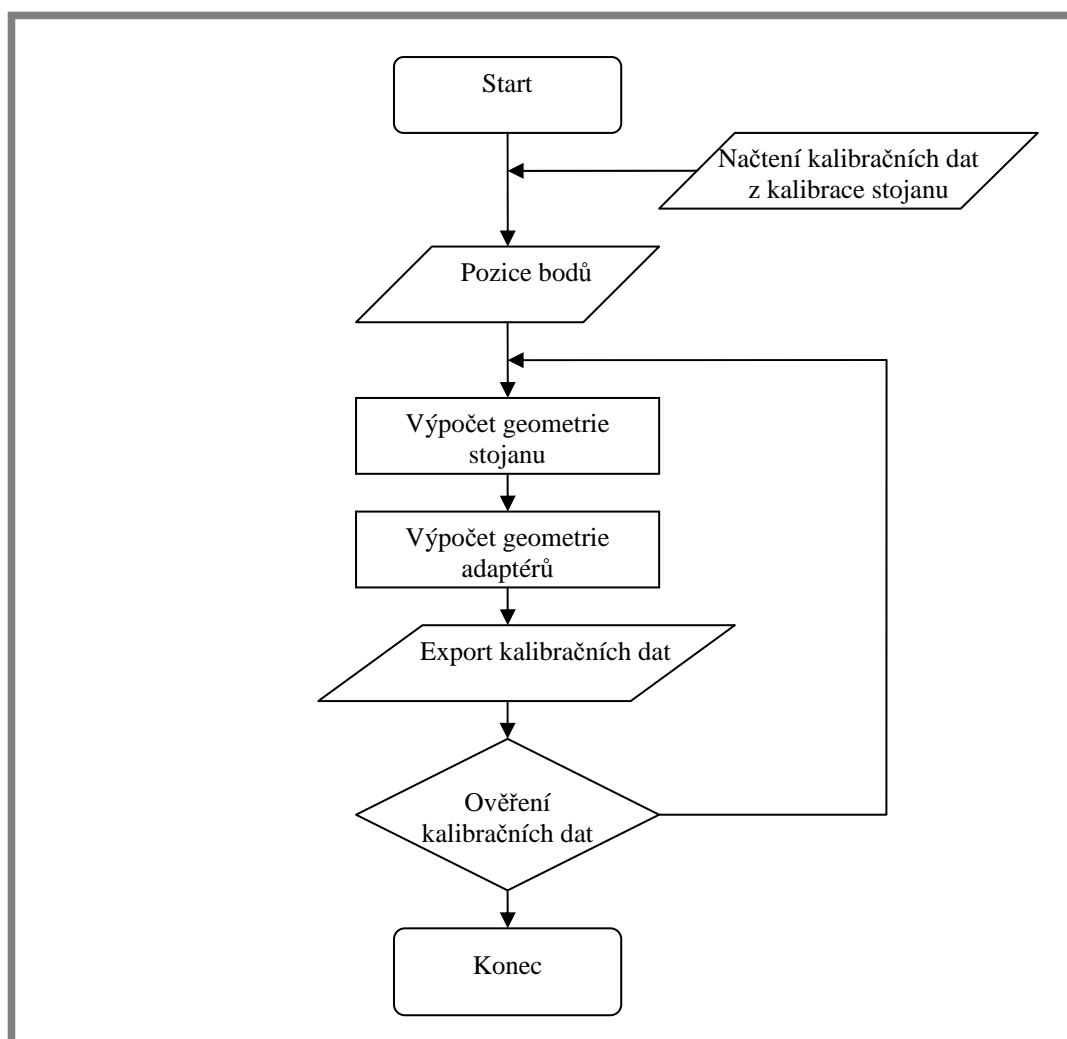
6.2.4

- **Makro č.1: Kalibrace stojanu**



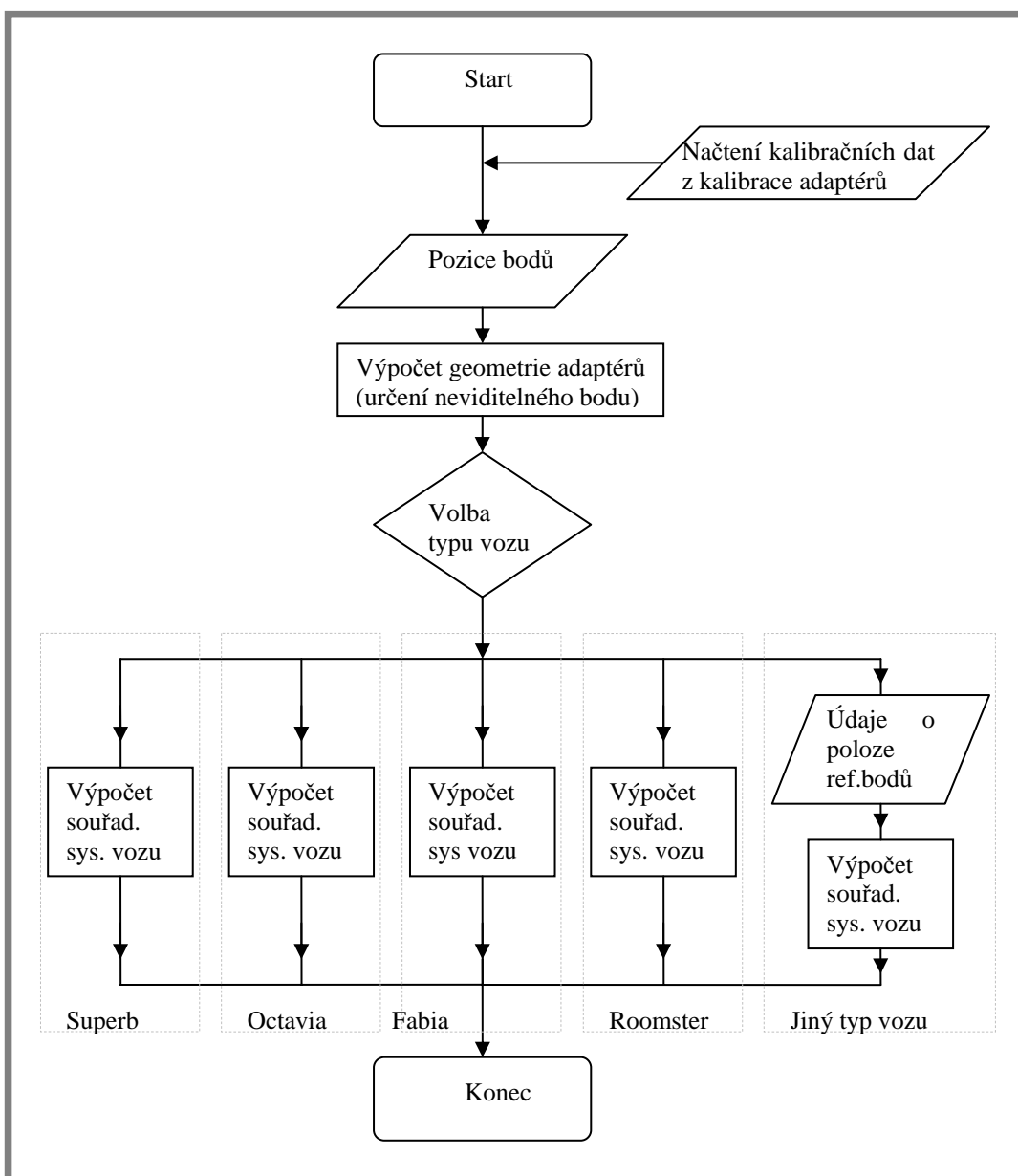
Obr. 41 Vývojový diagram – kalibrace stojanu

- **Makro č.2: Kalibrace adaptérů upnutých ve stojanu**



Obr. 42 Vývojový diagram – kalibrace adaptérů

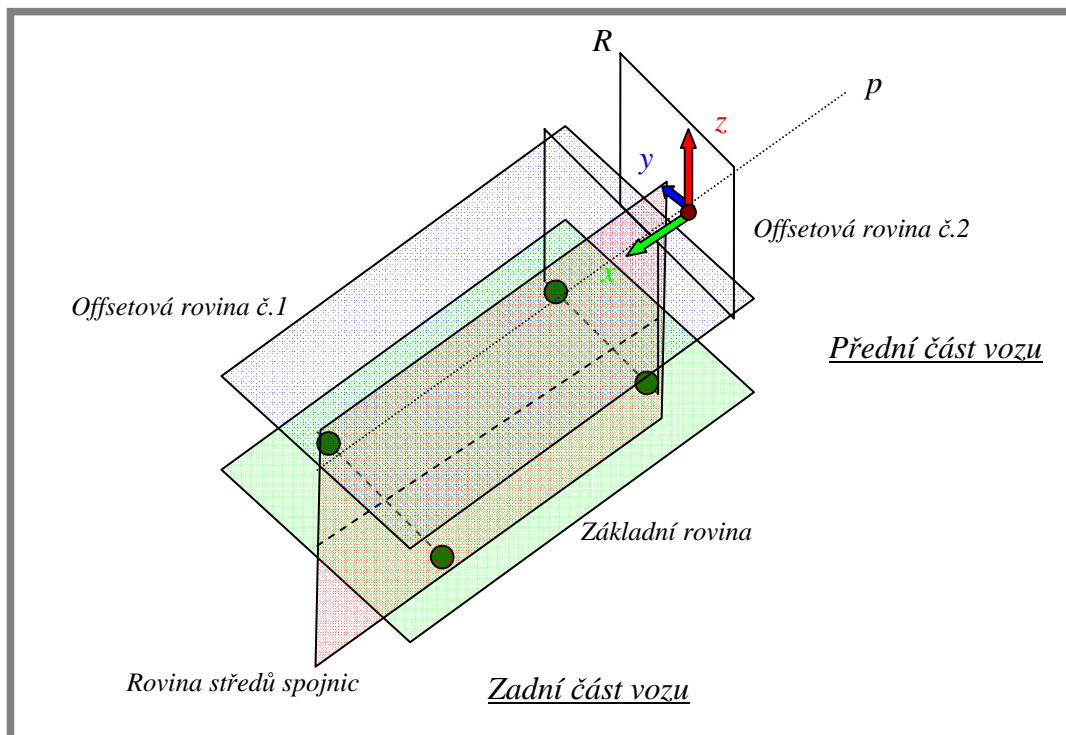
- **Makro č.3: Určení *neviditelného* bodu a výpočet souřadného systému**



Obr. 43 Vývojový diagram – výpočet souřadného systému

V průběhu tohoto makra nejprve dojde k určení *neviditelných* referenčních bodů na karoserii. Vzhledem k tomu, že u daných bodů znám jejich souřadnice, dojde k proložení základní roviny těmito čtyřmi body (Viz Obr. 44). Následuje vytvoření další roviny, která je s touto rovnoběžná a vzdálená o hodnotu z (offset č.1). Po určení středu dvojice bodů (vždy dva vpředu a dva vzadu) je těmito středy proložena přímka, poté vytvořena rovina, ve které tato přímka leží a zároveň je kolmá na základní rovinu. Průsečnice této roviny s rovinou offsetovou tvoří přímku p , na níž leží počátek souřadného systému. Zbývá tedy jeden stupeň volnosti. Ten je vymezen průsečíkem roviny R s přímkou p . Rovina R je dána spojnici dvou předních bodů

karoserie, je kolmá na základní rovinu a zároveň posunuta o hodnotu x , která je dána typem vozu.. Tímto je dosaženo určení počátku souřadného systému. Orientace a směr jednotlivých os potom vyplývá s orientace vytvořených rovin, přičemž osa x vždy směřuje do vozu, osa z vzhůru a osa y dle pravidla pravé ruky.



Obr. 44 Výpočet souřadného systému

Pozn.: Tento algoritmus je společný pro všechny typy sériově vyráběných vozů Škoda s výjimkou vozu Roomster, kde nejsou hodnoty z -tových souřadnic jednotlivých bodů shodné (důvodem je koncepce podvozku, která je tvořena spojením podvozků dvou odlišných vozů, Fabie a Octavie). Před spuštěním výše popsání algoritmu proto proběhne výšková korekce zadní dvojice bodů.

6.2.5 Zhodnocení softwarového řešení

Pro jednotlivé činnosti popsané v 6.2.3 jsem vytvořil v jazyce Python celkem tři obsáhlá makra (přes jedenáct tisíc řádků), která umožňují automatický průběh činnosti při minimálním nutném zásahu uživatele. Při sestavování skriptu jsem kladl důraz na vzájemnou interakci, co možná nejjednodušší interpretaci a popis jednotlivých kroků pro pozdější úpravy skriptu. Makra jsou univerzální a umožňují výpočet souřadného systému pro všechny typy vozů společnosti Škoda.

Pro představu uvádím prvních pár řádků makra, které kalibruje stojan:

```
# Script: Kalibrace stojanu
# GOM-Script-Version: 6.0.2-6

import os.path # Import the 'os.path' module.
import shutil  # Import the 'shutil' module.
import gom

adresar_kalibrace=' /home/demo/Documents/Kalibrace_souradneho_systemu_vozu'
```


7. ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

7.1 Ověření přesnosti

Pro ověření přesnosti, se kterou systém určí polohu jednotlivých pozic referenčních bodů na karoserii, jsem se rozhodl změřit pozice bodů přímou metodou bez použití adaptérů. V praxi to znamenalo zvednout vůz na zvedacím stojanu, přesně označit jednotlivé referenční body, aplikovat měřítkové tyče a pomocné body a celou oblast nasnímat (viz Obr. 45 a Obr. 46).



Obr. 45 Ověření přesnosti



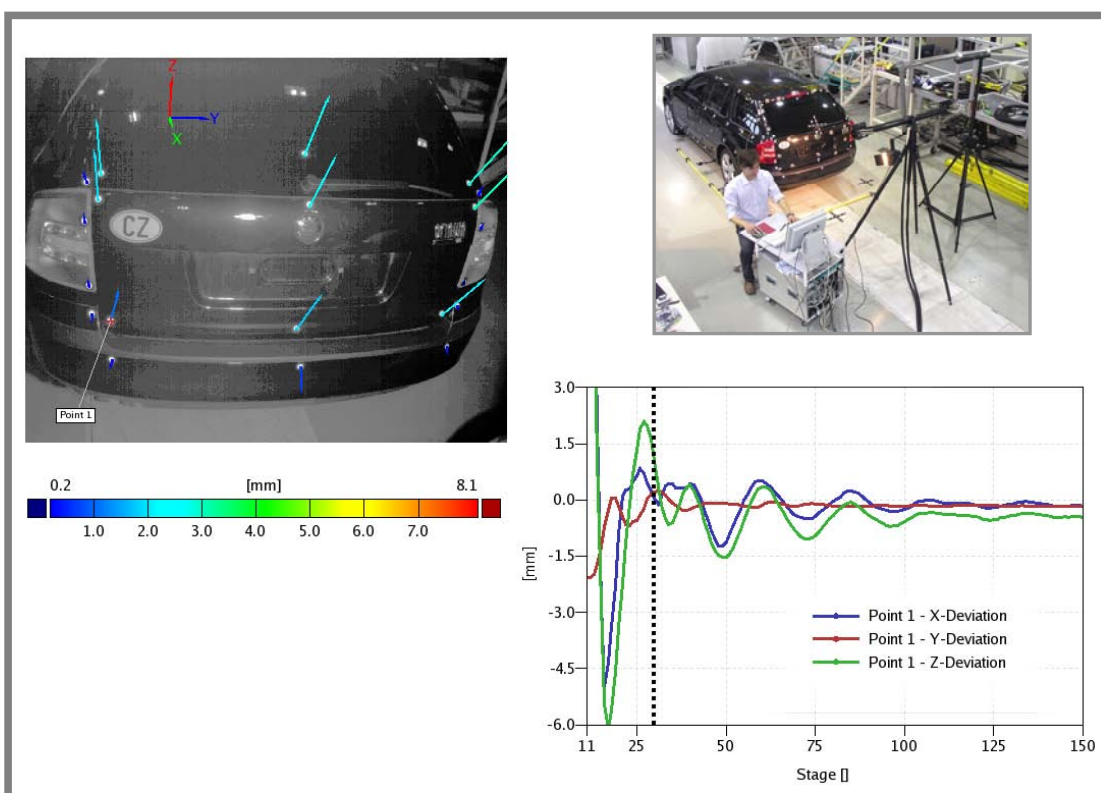
Obr. 46 Ověření přesnosti

Po vyhodnocení snímků jsem změřil rozteče jednotlivých děr, které referenční body charakterizují. Při porovnání totožných údajů, kdy byly pozice děr určeny na stojícím voze pomocí adaptérů, byla zjištěna nejvyšší odchylka **1,5 mm**. Zpětné určení pozice referenčního bodu pomocí adaptéru je přitom provedeno s relativně vysokou přesností⁴ **0,01 mm**, která je dána faktem, že geometrie adaptéru je zaznamenána v průběhu kalibrace, a to za podmínek samotného měření (~15 minut předem), čímž je dosaženo nezávislosti na teplotních podmínkách, pokud se tyto během zmíněných 15 minut nezmění. Tuto přesnost jsem ověřil opakovaným prováděním obou kroků kalibrace a statistickým porovnáváním výsledků. Celkovou odchylku přisuzuji z větší části rozdílně deformované karoserii, kdy stav vyzdvihnutého vozu neodpovídá přesně podmínkám vozu stojícího všemi koly na zemi (tedy podmínkám, za kterých bylo použito adaptéru). Po konzultaci se zadavatelem diplomové práce (vedoucí dynamické zkušebny Škoda Auto) se určená přesnost jeví jako dostatečná pro definování souřadného systému vozu.

7.2 Ověření funkčnosti při účasti na měřeních

Pro ověření funkčnosti, ať už konstrukčního, tak i softwarového řešení, jsem provedl několik měření, při kterých bylo řešení použito. Jako příklad uvádím *kolizní měření pátých dveří*. Z hlediska utajení byla zkouška provedena na sériovém vozidle Octavia Kombi, ale měla přímou následnost u zkoušky na prototypovém vozidle. Cílem bylo zjistit složky vektorů pohybu bodů na vybraných místech pátých dveří tak, aby mohli konstruktéři odhadnout místo případné kolize dveří s jinými komponenty v okolí (zadní svítlna, sloupky, nárazník..). Obr. 47 ukazuje výsledné rozložení složek vektoru pohybu pro jeden bod v průběhu zavírání dveří.

7.2



Obr. 47 Měření

⁴ Vychází ze směrnice VDI 2634, podle které je systém Tritop verifikován. Směrnice Viz. [26]

Toto měření jsem provedl desetkrát, přičemž jsem zaznamenával hodnoty složek vektorů pohybu bodu v levé spodní části 5. dveří (Viz Obr. 47 – *Point 1*). Maximální hodnoty posuvů v jednotlivých osách jsou zaznamenány v Tab. 3.

Tab. 3 Měření – *Point 1* [absolutní hodnota v mm]

Měření	x-posuv	y-posuv	z-posuv
1	0,99	0,43	5,58
2	0,87	0,33	4,02
3	1,22	0,9	6,01
4	0,98	0,39	4,12
5	1,14	0,42	5,58
6	1,24	0,58	6,12
7	1,01	0,45	5,67
8	0,87	0,38	5,02
9	1,12	0,45	5,32
10	1,18	0,61	5,33

Statistické vyhodnocení výsledků měření [27]

Průměrný posuv

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{0,99 + 0,87 + \dots + 1,18}{10} = 1,062 \text{ mm}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{0,43 + 0,33 + \dots + 0,61}{10} = 0,494 \text{ mm}$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i = \frac{5,58 + 4,02 + \dots + 5,33}{10} = 5,277 \text{ mm}$$

Rozptyl

$$s_x^2 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \bar{x}^2 = \frac{0,99^2 + \dots + 1,18^2}{10} - 1,062^2 = 0,017 \text{ mm}^2$$

$$s_y^2 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) - \bar{y}^2 = \frac{0,43^2 + \dots + 0,61^2}{10} - 0,494^2 = 0,025 \text{ mm}^2$$

$$s_z^2 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2 \right) - \bar{z}^2 = \frac{5,58^2 + \dots + 5,33^2}{10} - 5,277^2 = 0,458 \text{ mm}^2$$

Směrodatná odchylka

$$s_x = \sqrt{s_x^2} = \sqrt{0,017^2} = 0,130 \text{ mm}$$

$$s_y = \sqrt{s_y^2} = \sqrt{0,025^2} = 0,158 \text{ mm}$$

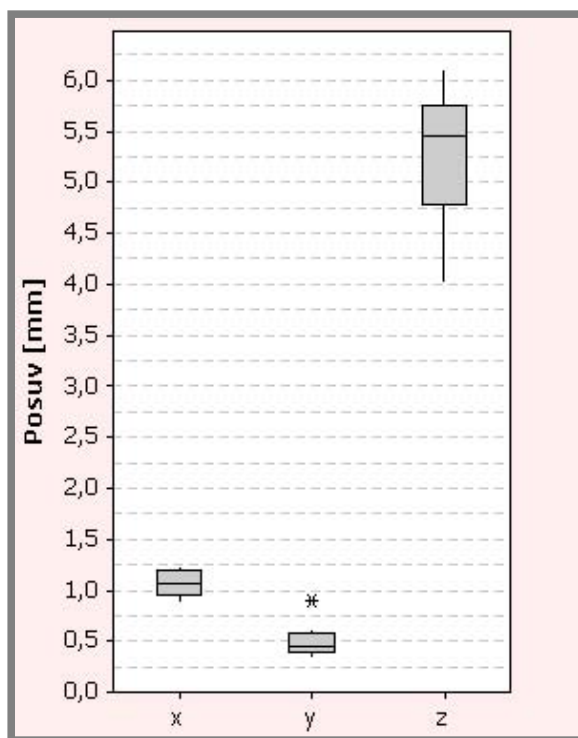
$$s_z = \sqrt{s_z^2} = \sqrt{0,458^2} = 0,676 \text{ mm}$$

Medián

$$\tilde{x} = \frac{1}{2} \left[x_{\frac{n}{2}} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right] = \frac{1,12 + 1,14}{2} = 1,13 \text{ mm}$$

$$\tilde{y} = \frac{1}{2} \left[y_{\frac{n}{2}} + y_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right] = \frac{0,43 + 0,45}{2} = 0,44 \text{ mm}$$

$$\tilde{z} = \frac{1}{2} \left[z_{\frac{n}{2}} + z_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right] = \frac{5,33 + 5,58}{2} = 5,46 \text{ mm}$$



Obr. 48 Krabicový diagram pro hodnoty posuvů

Obr. 48 ukazuje krabicový diagram pro rozložení hodnot posuvů. Je z něj patrné, že rozpětí hodnot posuvu ve směru osy z je několikrát vyšší než rozpětí posuvů pro zbylé dva směry. Je to dáno tím, že v tomto směru dochází k nejvyšším posuvům oproti klidovému stavu a citlivost na excitaci síly, kterou dojde k zavření dveří, je nejvyšší.

Pozn: bod označen symbolem hvězdičky je považován za odlehlou hodnotu (tzv. outlier) a byl zřejmě způsoben špatným měřením.

Takto statisticky zpracované hodnoty spolu s extrémními hodnotami pro posuvy v každém směru byly vyexportovány k další analýze pro konstrukční oddělení.

8. DISKUZE

8.1 Závěr

V rámci řešení diplomové práce jsem nejprve provedl analýzu oblasti optických měřících zařízení, která spočívala v pochopení principů, na kterých jsou tyto zařízení založeny. Podrobně jsem se seznámil se systémy Tritop a Pontos (firma GOM), které jsou v Dynamické zkušebně Škoda Auto využívány k bezkontaktnímu měření deformací.

Po seznámení s problémem, se kterým se zaměstnanci zkušebny při užívání těchto systémů setkávali (definování souřadného systému), jsem přistoupil k samotnému řešení. Navrhl jsem dvě varianty adaptérů, pomocí kterých má uživatel možnost snadno a rychle definovat souřadný systém vozu. Při návrhu jsem bral v úvahu aspekty nákladů na výrobu, jednoduchost řešení a snadnou obsluhu (montáž a demontáž) adaptérů. Po zvážení výhod a nevýhod obou variant jsem přistoupil k realizaci jedné z nich.

Řešení také zahrnovalo vytvoření softwarové podpory, která automaticky implementuje adaptéry do systému Tritop, definuje jejich geometrii a vypočítává polohu souřadného systému. Pro zajištění těchto činností jsem v jazyce Python vytvořil tři obsáhlá makra (více než jedenáct tisíc řádků), přičemž jsem dbal na uživatelsky příjemnou obsluhu, jednoznačnost interaktivních zásahů do průběhu výpočtů a podrobný popis makra pro možnost následných úprav a modifikací.

Přesnost systému a opakovatelnost jeho použití byla testována jak mnou samotným při sérii opakovaných kalibrací a měření, tak zadavatelem diplomové práce.

Navržený systém je univerzální, použitelný pro všechny typy koncernových vozů Škoda Auto a.s. Navíc lze využít nejen pro ustavení souřadného systému pro zařízení Pontos, jak bylo vyžadováno, ale také pro další optické měřící systémy na společné platformě firmy GOM (Atos a Tritop).

Systém byl zadavatelem posouzen jako vhodný k využití v rámci měření v Dynamické zkušebně a v současné době je již plně využíván zaměstnanci zkušebny.



Obr. 49 Kalibrační stojan a adaptéry

8.2 Možnost další návaznosti na diplomovou práci

8.2

8.2.1 Určování souřadného systému pro specifické případy

8.2.1

Navržený systém pomáhá určit souřadný systém vozu a tím metodicky vztahovat naměřené charakteristiky k virtuálním modelům. Toto se týká ať už celého vozu, nebo jeho jednotlivých komponent v rámci zástavby na voze. V praxi se však může vyskytnout i případ, kdy zkoumáme komponentu upevněnou na montážním přípravku mimo vůz (např. na vibrační stoličce). Určení souřadného systému v tomto případě je možno několika způsoby. Při použití prvního způsobu může být souřadný systém definovaný na komponentu ve stavu, kdy je namontován na voze a je použito stávajícího řešení, tak jak je popsáno výše. Po demontáži je souřadný systém stále ustaven díky pomocným bodům na komponentu.

Dalším způsobem je využití připojovacích prvků jednotlivých komponent jako například pozice děr, čepů atd. Při znalosti souřadnic těchto prvků je možné určit souřadný systém. Problém však tkví v tom, že připojovací prvky jsou obvykle využity i při montáži komponentu na přípravek, který je svým způsobem vždy unikátní a vyrobený přímo pro potřeby daného měření. V takovém případě nelze přesně určit pozici daného prvku kvůli tomu, že na něj nevidíme. Řešení spočívá v kalibraci montážního přípravku, kdy si ještě před samotnou montáží komponenty určíme polohu připojovacích rozměrů (minimálně 3) vůči skupině pomocných bodů. Princip sestavení výpočtu je obdobný jako u stávajícího řešení, stačí tedy mírně modifikovat již sestavená makra.

8.2.2 Možnost využití informací o reálném stavu karoserie

8.2.2

Jak již bylo zmíněno, každé vozidlo je určitým způsobem deformováno. Tyto deformace mohou být způsobeny nejen provozním zatížením, ale už i samotnou výrobou a montáží jednotlivých komponent. Na trhu existuje celá řada komerčních řešení rovináčích stolic (Celleste, Blackhawk a další), které využívají tabulkových hodnot pozic specifických míst na karoserii. Po zjištění reálných hodnot potom vyrovnávají deformaci vypočteným zatěžováním. Systém, který jsem navrhl, určuje reálnou polohu čtveřice referenčních bodů. Systém upnutí by se dal jednoduše modifikovat také na jiné body karoserie (dle potřeb rovináčích stolic) a být tak levnou a rychlou alternativou ke zmíněným komerčním řešením.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] THOMAS LUHMAN, *Nahbereichsphotogrammetrie*. 2. vydání, přepracované. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2003. 586 s. ISBN: 3-87907-398-9
- [2] Werner Bösemann, *Advances in photogrammetric measurement solutions*, Computers in Industry 56 (2005) 886–893
- [3] DIRK BEHRING, JAN THESING, HOLGER BECKER, ROBERT ZOBEL, *Optical measuring techniques for the determination and visualization of 3D displacements in crash investigations*. Society of Automotive Engineers (SAE), 2001. 03-B55
- [4] Frode Grytten, Egil Fagerholt, Trond Auestad, Bernt Forre, Tore Borvik, *Out-of-plane deformation measurements of an aluminium plate during quasi-static perforation using structured light and close-range photogrammetry*. International Journal of Solids and Structures 44 (2007) 5752–5773
- [5] Armin Gruen, *Fundamentals of videogrammetry - A review*. Human Movement Science 16 (1997) 155-187
- [6] Bill Triggs, Philip McLauchlan, Richard Hartley, Andrew Fitzgibbon, *Bundle Adjustment - A Modern Synthesis*. Computer Science, Vol. 1883, January 2000
- [7] Jörg Albertz, *Albrecht Meydenbauer – Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage*. Technical University of Berlin, Photogrammetry and Cartography, Proceedings 18th International Symposium CIPA 2001, Potsdam (Germany), September 18 - 21, 2001
- [8] ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie [online]. Laboratoř fotogrammetrie [cit. 2007-10-10]. URL: <<http://lfgm.fsv.cvut.cz/print.php?cap=&zal=170?=cz>>
- [9] Oliver Erne, Harald Friebe, Konstantin Galanulis, *Is it possible to replace conventional displacement and acceleration sensor technology? Solution methods using optical 3D measuring technology*. Fahrzeugversuch Methoden und Verfahren, Expert Verlag, 2006. ISBN-13: 978-3-8169-2579-8
- [10] Gessellschaft für optische Messtechnik mbH – Firemní materiály, články a technická dokumentace
- [11] Pontos V6, User Manual, Gessellschaft für optische Messtechnik mbH
- [12] Clive S. Fraser, *Automated Processes in Digital Photogrammetric Calibration, Orientation, and Triangulation*. Digital signal procesing 8, 277–283 (1998), článek číslo SP980321
- [13] Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. Praha 9, Letňany. [online]. [cit. 2007-10-24]. URL: <<http://www.vzlu.cz>>
- [14] GOM users meeting 2007: presentation from Ford BodyLab, Germany
- [15] Tritop V6, User Manual, Gessellschaft für optische Messtechnik mbH
- [16] František Vlk, *Stavba motorových vozidel*. Brno: nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2003. 499 s. ISBN: 80-238-8757-2 (str. 382-410)
- [17] Vačkové mechanismy a jejich zdvihové závislosti – 6. přednáška z cyklu „Konstruování strojů – mechanismy“. Garant předmětu: prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
- [18] Dan MacLeod, Steven Strauss, *The Rules Of Work (A Practical Engineering Guide to Ergonomics)*. New York: Tailor & Francis Publishing Office, 2000. 192 s. ISBN: 1560328851

- [19] Charles A. Cacha, *Ergonomics and Safety in Hand Tool Design*. London: Lewis Publisher, 1999. 128 s. ISBN: 1566703085
- [20] Alan Gauld, *Learning to Program Using Python*. Addison-Wesley Publisher, 2001. 256 s. ISBN: 0201709384
- [21] CHRISTOPHER, T.W. *Python Programming Patterns*. Prentice Hall, 2002. 400 s. ISBN: 0130409561
- [22] BEAZLEY, D.M. *Python Essential Reference (2nd Edition)*. New Riders Publishing, 2001. 416 s. ISBN: 0735710910
- [23] Python 2.5 Documentation, Python Software Foundation
- [24] The GOM Scripting Language, Expert Manual, Gessellschaft für optische Messtechnik mbH
- [25] Wikipedie, otevřená encyklopedie. [online]. [cit. 2008-03-09]. URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Filosofie_Pythonu>
- [26] RAUTENBERG, U.; WIGGENHAGEN, M. Acceptance test and verification test for photogrammetric measuring systems based on VDI guideline 2634, Page 1. [online]. [cit. 2008-04-11]. URL: <http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/VDI2634_1e.pdf>
- [27] KARPÍŠEK, Z. *Matematika IV. : Statistika a pravděpodobnost*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 170 s. ISBN: 8021425229

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

h [mm]	<i>vzdálenost</i>
c [mm]	<i>ohnisková vzdálenost</i>
x, y [mm]	<i>souřadný systém snímku</i>
x_H, y_H [mm]	<i>souřadnice ohniska v rovině snímku</i>
x_P, y_P [mm]	<i>souřadnice měřicího bodu P promítnutého do roviny snímku</i>
X, Y, Z [mm]	<i>souřadný systém objektu</i>
X^*, Y^*, Z^* [mm]	<i>pomocný souřadný systém</i>
X_O, Y_O, Z_O [mm]	<i>souřadnice středu promítání v souřadném systému v souřadném systému objektu</i>
X_P, Y_P, Z_P [mm]	<i>souřadnice měřicího bodu P v souřadném systému objektu</i>
X_P^*, Y_P^*, Z_P^* [mm]	<i>pomocný souřadný systém měřicího bodu P</i>
dx, dy [mm]	<i>zkreslení objektivu</i>
B	<i>rovina snímku</i>
R	<i>matice rotace</i>
$3D$	<i>třídimenzionální</i>
HS	<i>High Speed (vysokorychlostní)</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
RPS	<i>Referent Points System</i>
GOM	<i>Gessellschaft für optische Messtechnik</i>
OS	<i>Operační systém</i>

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1	MODEL KAMERY (ROVINA SNÍMKU B JE KVŮLI LEPŠÍ NÁZORNOSTI ZRCADLENA) [3].....	17
OBR. 2	URČENÍ SOUŘADNIC MĚŘÍCÍCH BODŮ P_i VYROVNÁNÍM SVAZKŮ PROJEKČNÍCH PAPRSKŮ Z RŮZNÝCH ROVIN SNÍMKŮ B_i [3].....	18
OBR. 3	ALBRECHT MEYDEBAUER (1886) [7]	19
OBR. 4	KAMERA VLASTNÍ KONSTRUKCE [7]	19
OBR. 5	STEREOKOMPARÁTOR DLE NÁVRHU PULFRICHA, 1901 [8].....	20
OBR. 6	DVOJICE KAMER SYSTÉMU PONTOS [10]	21
OBR. 7	KÓDOVANÉ A NEKÓDOVANÉ BODY [10].....	22
OBR. 8	MĚŘÍCÍ VZDÁLENOST PRO RŮZNÉ TYPY OBJEKTIVŮ [11].....	22
OBR. 9	URČENÍ ÚHLU NATOČENÍ KAMER [11].....	23
OBR. 10	PŘÍKLAD POZIC KŘÍŽE PŘI PROCESU KALIBRACE [11]	23
OBR. 11	ÚTLUM PÁTÝCH DVEŘÍ ŠKODA OCTAVIA	24
OBR. 12	MĚŘENÍ ODEZVY LISTU VRTULE V ČASE PŘI ROTACI PODLE VSTUPNÍHO SIGNÁLU [13].....	25
OBR. 13	DEFORMACE KŘÍDLA V AERODYNAMICKÉ TUNELU PŘI RYCHLOSTI VZDUCHU 70M/S [10]	25
OBR. 14	VYCHÝLENÍ RÁMU OKNA V AERODYNAMICKÉM TUNELU [14].....	25
OBR. 15	SIMULOVANÝ NÁRAZ PŘI 25KM/H [10].....	26
OBR. 16	DROP TEST MOBILNÍHO TELEFONU [10]	26
OBR. 17	SNÍMÁNÍ 3D OBJEKTU POMOCÍ TRITOP KAMERY [15]	27
OBR. 18	ROZLOŽENÍ 3D OBJEKTU PŘI SNÍMÁNÍ [15]	27
OBR. 19	STÁVAJÍCÍ PRINCIP URČOVÁNÍ SOUŘADNÉHO SYSTÉMU	28
OBR. 20	VYMEZENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	29
OBR. 21	WORKFLOW.....	30
OBR. 22	ROZMÍSTĚNÍ BODŮ.....	32
OBR. 23	DETAIL BODU (KRYTÝ PRYŽOVOU UCPÁVKOU A ODKRYTÝ)	32
OBR. 24	UMÍSTĚNÍ ADAPTÉRŮ NA PODÉLNÍCÍCH KAROSERIE (ZOBRAZENY POUZE 2 ADAPTÉRY)	33
OBR. 25	UMÍSTĚNÍ ADAPTÉRŮ POD PRAHY KAROSERIE (ZOBRAZENY POUZE 2 ADAPTÉRY)	33
OBR. 26	ADAPTÉR PRO DÍRY NA PODÉLNÍCÍCH	34
OBR. 27	DETAIL ADAPTÉRU	34
OBR. 28	DETAIL UPÍNACÍ HLAVY ADAPTÉRU	34
OBR. 29	DETAIL ÚCHOPU OVLÁDÁNÍ UPÍNACÍ HLAVY	34
OBR. 30	ADAPTÉR PRO DÍRY POD PRAHY KAROSERIE.....	35
OBR. 31	DETAIL ADAPTÉRU	35
OBR. 32	DETAIL ADAPTÉRU	37
OBR. 33	SILIKONOVÁ FORMA PRO VAKUOVÉ LITÍ.....	37
OBR. 34	KALIBRAČNÍ STOJAN.....	39
OBR. 35	VRCHNÍ POHLED NA DESKU STOJANU.....	39
OBR. 36	KULOVÝ ADAPTÉR (GOM) V KALIBRAČNÍM STOJANU.....	40
OBR. 37	WORKFLOW.....	41
OBR. 38	KALIBRACE STOJANU.....	41
OBR. 39	KALIBRACE PŘÍPRAVKŮ.....	42
OBR. 40	APLIKACE NA AUTOMOBIL.....	42
OBR. 41	VÝVOJOVÝ DIAGRAM – KALIBRACE STOJANU	43
OBR. 42	VÝVOJOVÝ DIAGRAM – KALIBRACE ADAPTÉRŮ.....	44
OBR. 43	VÝVOJOVÝ DIAGRAM – VÝPOČET SOUŘADNÉHO SYSTÉMU	45
OBR. 44	VÝPOČET SOUŘADNÉHO SYSTÉMU	46
OBR. 45	OVĚŘENÍ PŘESNOSTI	48
OBR. 46	OVĚŘENÍ PŘESNOSTI	48
OBR. 47	MĚŘENÍ.....	49
OBR. 48	KRABICOVÝ DIAGRAM PRO HODNOTY POSUVŮ	51
OBR. 49	KALIBRAČNÍ STOJAN A ADAPTÉRY	52

SEZNAM TABULEK

TAB. 1	PRŮMĚRY DĚR.....	35
TAB. 2	POROVNÁNÍ VARIANT.....	36
TAB. 3	MĚŘENÍ – <i>POINT 1</i>	50

SEZNAM PŘÍLOH

- A. Filozofie Pythonu - překlad**
- B. Výkresová dokumentace: Sestava stojanu**
- C. Výkresová dokumentace: Sestava adaptéru**
- D. Uživatelský návod**
- E. Hodnocení zadavatelem diplomové práce**

Pozn: Výkresová dokumentace je provedena dle podnikových zvyklostí a neodpovídá tak plně normovaným standardům.

The Zen of Python, by Tim Peters [25] (Příloha A)

Originální znění

Beautiful is better than ugly.
Explicit is better than implicit.
Simple is better than complex.
Complex is better than complicated.
Flat is better than nested.
Sparse is better than dense.
Readability counts.
Special cases aren't special enough to break the rules.
Although practicality beats purity.
Errors should never pass silently.
Unless explicitly silenced.
In the face of ambiguity, refuse the temptation to guess.
There should be one—and preferably only one—obvious way to do it.
Although that way may not be obvious at first unless you're Dutch.
Now is better than never.
Although never is often better than **right** now.
If the implementation is hard to explain, it's a bad idea.
If the implementation is easy to explain, it may be a good idea.
Namespaces are one honking great idea — let's do more of those!

Volný překlad

Krásný je lepší než ošklivý.
Explicitní je lepší než implicitní.
Jednoduchý je lepší než složitý.
Složitý je lepší než komplikovaný.
Plochý je lepší než zanořený.
Řídký je lepší než hustý.
Na čitelnosti záleží.
Speciální případy nejsou dost speciální, aby ospravedlnily porušení pravidel.
Ačkoliv praktičnost vyhrává nad čistotou.
Chyby by nikdy neměly projít potichu.
Pokud nejsou záměrně zamlčeny.
Pokud se setkáš s nejednoznačností, odolej pokušení odhadovat.
Měl by existovat jeden — a pokud možno pouze jeden — zřejmý způsob jak to udělat.
Ačkoliv tento způsob nemusí být hned zřejmý, pokud nejsi Holanďan.
Teď je lepší než nikdy.
Ačkoliv nikdy je často lepší než **právě** teď.
Pokud lze implementaci vysvětlit jen s obtížemi, jde o špatnou myšlenku.
Pokud lze implementaci vysvětlit snadno, mohla by to být dobrá myšlenka.
Jmenné prostory jsou jednou z velkých myšlenek — jen víc takových!

Anglický originál textu se vypíše, pokud v interaktivním režimu uživatel zadá příkaz
`>>> import this`. Podobným legráckám a nečekaným věcem umístěným do programů se říká *velikonoční vajíčka*.